

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05728

研究課題名(和文) 難成形板材の創形創質技術としてのレーザー援用局所加熱逐次張出し成形技術の開発

研究課題名(英文) Development of incremental forming technology with local heating by laser irradiation as a quality-products processing technology for difficult-to-form sheet metals

研究代表者

日野 隆太郎 (Hino, Ryutaro)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10283160

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：AZ31マグネシウム合金板および純チタン板を用いてレーザー援用局所加熱逐次張出し成形法による円錐台・正四角錐台成形実験を行い、局所加熱条件(レーザー出力、デフォーカス、ピーク温度)と成形条件(工具速度、斜面傾斜角)が成形性や製品形状精度に及ぼす影響を調査した。また局所加熱・成形プロセスが成形品の微視組織と機械的特性に及ぼす影響についても調査した。AZ31合金板では局所加熱温度の上昇が成形性の向上をもたらすが、純チタン板では微小孔欠陥の発生により高温での成形性は悪化した。AZ31合金板成形品の硬さは成形中の加工硬化、動的再結晶および粒成長により変化し、局所加熱温度が低いほど高硬度となった。

研究成果の概要(英文)：Incremental sheet forming experiments with local heating by laser irradiation were conducted using AZ31 magnesium alloy sheets with a thickness of 0.78 mm and pure titanium sheets with a thickness of 1 mm. Truncated cone shells and truncated square pyramid shells were formed under various conditions. Then influences of local heating conditions and forming conditions on formability and product shape accuracy were investigated. Influences of the local heating / forming process on microstructure and mechanical properties of the formed products were also examined. As for AZ31 alloy sheet, the rise in the local heating temperature leads to improvement of the formability, but in the case of pure titanium sheet the formability at high temperature deteriorates due to the occurrence of pinhole-like defect. Hardness of the AZ31 products varied depending on work hardening, dynamic recrystallization and grain growth during forming, and became higher as the local heating temperature decreased.

研究分野：弾塑性工学，塑性加工学

キーワード：レーザー局所加熱逐次張出し インクリメンタルフォーミング マグネシウム合金板 チタン板 成形性  
微視組織と機械的特性 形状精度

1. 研究開始当初の背景

少量生産品や単一加工品の製造において金型を用いたプレス成形による製造はコストの面で困難であり、現在でも手作業に依存することが多い。このような多品種少量成形加工に適したフレキシブルな板材成形技術として、単純棒状工具を素板に押し当てて三次元運動させ逐次的に成形を行う逐次張出し成形法（インクリメンタルフォーミング）の研究が1990年代初め頃に我が国で始まり、近年では世界的にその研究が行われている。

この逐次張出し成形法において工具接触部の板材を局所的に加熱すれば、成形限界が飛躍的に向上し難成形板材の加工が可能になること、成形品の残留応力が低減することなどがわかっている（引用文献①～③）。しかし、成形品形状精度とその向上策については検討不十分であり、また成形品の機能や安全性の面で重要な成形品強度特性についても未知の部分が多く、成形技術としては未だ発展途上の段階である。

2. 研究の目的

本研究では局所加熱にレーザ照射を利用したレーザ援用局所加熱逐次張出し成形において、その優れた成形性と局所加熱効果を活用することにより、高い形状精度と所望の強度特性を兼ね備えた成形品が得られるような技術の開発を目指す。成形素材としては軽量・高強度の難成形板材であるマグネシウム合金板、およびチタン板を選定し、局所加熱条件と工具運動条件が成形性や製品形状精度に及ぼす影響を明らかにすること、局所加熱条件が成形品の微視組織と強度特性に及ぼす影響を明らかにすることなどが具体的な検討課題となる。

3. 研究の方法

(1) 実験装置：本研究で使用したレーザ援用局所加熱逐次張出し成形装置の概略を図1に示す。成形装置のベースとなるNCフライス盤（イワシタ IB-IV）のワークテーブル上にブランクホルダが、主軸ヘッドに成形工具とレーザヘッドが固定されている。成形工具は2種類あり、ひとつは先端が半球状となった直径11mmのSKD11製丸棒である。もうひとつの工具は先端に直径11mmのSUJ2ベア

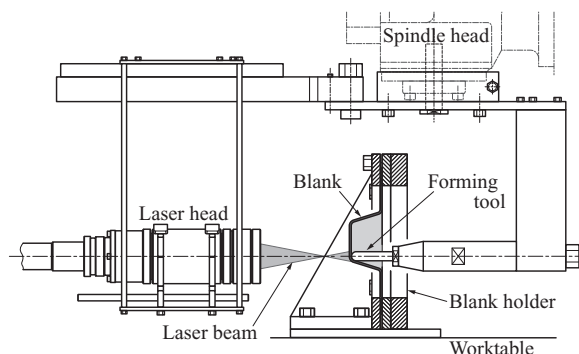
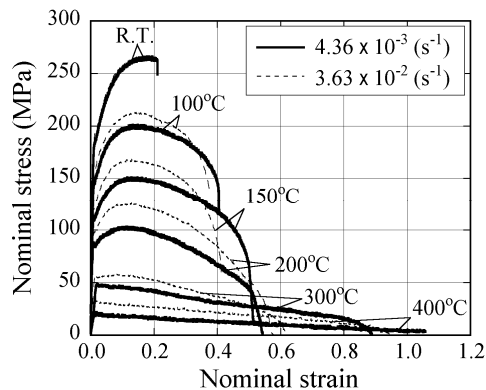


図1 レーザ援用局所加熱逐次張出し成形装置

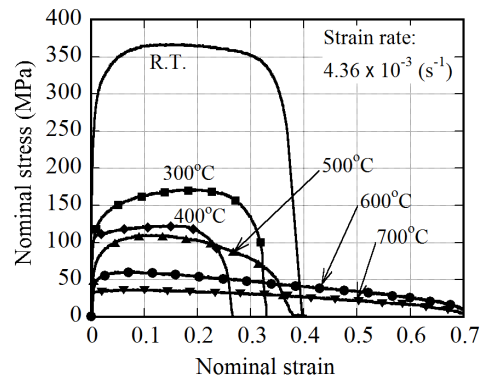
リング球を取り付けたボールペンタイプの工具である。成形工具は主軸ヘッドの動きにより3次元運動し、ブランクは図1の左方向に逐次張り出される。レーザヘッドと成形工具は互いに向き合い、ブランクの成形部表面（工具接触面の反対側）をレーザ照射により局所加熱しつつ逐次張り出し成形を行うことができる。またブランクとレーザヘッド間の距離を変化させてレーザのデフォーカス（焦点外し距離）を調節することができ、これによってレーザスポット径が調節できる。レーザ照射にはファイバ付き半導体レーザシステム（Laserline GmbH, LDF6000-40）を使用した。ファイバコア径0.4mmの円形スポットで集光レンズ焦点距離は100mmである。

(2) 供試材：供試材は板厚0.78mmのAZ31B-Oマグネシウム合金板（大阪富士工業株式会社製）、ならびに板厚1.0mmのJIS1種純チタン板（東京チタニウム製）である。これらの供試材素板から170mm×170mmの正方形板を切出し、成形実験用試験片として使用した。各供試材の応力-ひずみ曲線を図2に示す。AZ31は変形抵抗と延性に強い温度依存性があり、室温での成形加工は困難であるが150ないし200℃を超えると十分な延性を示し成形が可能となる。一方、純チタンの延性は400℃付近で最低となる特異な挙動を示す。

(3) 成形実験方法：成形目標形状は円錐台形と正四角錐台形であり、図3に示す等高線工

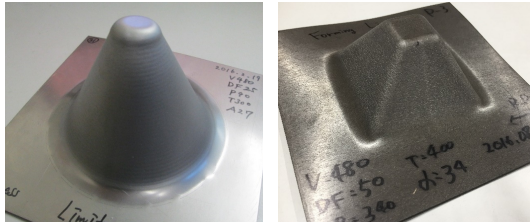
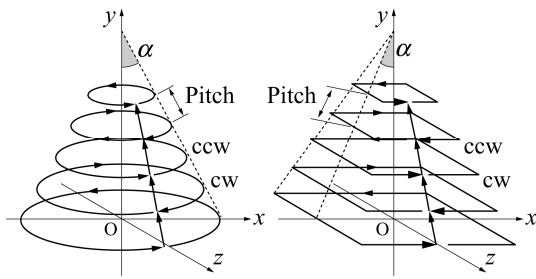


(a) AZ31 マグネシウム合金板



(b) JIS1 種純チタン板

図2 供試材の応力-ひずみ曲線



(a) 円錐台（純チタン） (b) 正四角錐台（AZ31）  
図3 成形実験における等高線工具経路の模式図と実際の成形品の例

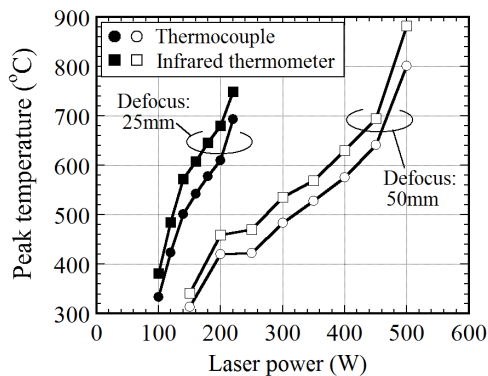


図4 純チタン板における局所加熱温度とレーザー出力・デフォーカスの関係

具経路で成形した。円錐台の上面・底面半径は 10, 50mm, 四角錐台における上面・底面の一辺は 20, 80mm である。工具速度は 480 および  $4000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  であり、経路の斜面方向ピッチは 1mm に統一した。AZ31 合金板の成形には SKD11 棒状工具を、純チタン板の成形においては工具表面への材料凝着回避のためベアリング球付き工具を用いた。

レーザーのデフォーカスは 25, 50mm の 2 通りとした。前者の場合、ブランク表面のレーザー照射スポット径は工具直径とほぼ同じ約 11mm であり、後者の場合はその約 2 倍のスポット径となる。局所加熱温度については、AZ31 合金板では室温から  $400^{\circ}\text{C}$  (レーザー出力  $0\sim 950\text{W}$ ) の範囲、純チタン板では  $300^{\circ}\text{C}$  から  $700^{\circ}\text{C}$  (レーザー出力  $90\sim 470\text{W}$ ) の範囲で数段階に設定した。これらのレーザー出力は後述の局所加熱温度測定実験結果に基づいて決定したものである。なお、レーザー照射角は板面法線に対して  $5^{\circ}$  とした。

工具-板材間の潤滑と板材冷却のため、不水溶性切削油 (JX 日鉱日石エネルギー製 Reliacut DE-P25) をブランク裏面 (工具接触面) 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を使用した。

(4) 局所加熱温度測定実験：成形実験における適切なレーザー出力を決定するため、温度測定実験を行った。ブランクホルダに固定した成形前の試験片表面上に円周軌道を描くようにレーザー照射を行い、その軌道上の一点における温度履歴を熱電対や放射温度計によって測定した。板材表面温度はレーザー照射スポットの接近に伴い急上昇し、スポット通過時に最高となり、スポット通過後は切削油剤の冷却効果により低下した。本研究ではこのレーザースポット通過時のピーク温度を局所加熱温度として扱った。例として図 4 に純チタン板におけるレーザー出力・デフォーカスと局所加熱温度の関係を示す。

(5) 成形性調査試験：逐次張出し成形では、ブランク初期板厚  $t_0$ 、成形品の斜面部板厚  $t$ 、成形品の斜面傾斜角  $\alpha$  (半頂角, 図 3 参照) の間に  $t = t_0 \sin \alpha$  の関係 (サイン則) が成り立つことが知られている。このことから斜面傾斜角  $\alpha$  が成形性の指標 ( $\alpha$  が小さいほど成形性が良い) となる。そこで各条件において斜面傾斜角  $\alpha$  を  $1^{\circ}$  刻みで小さくしながら成形を繰り返し、破断せずに成形できる最小の  $\alpha$  を見出した。

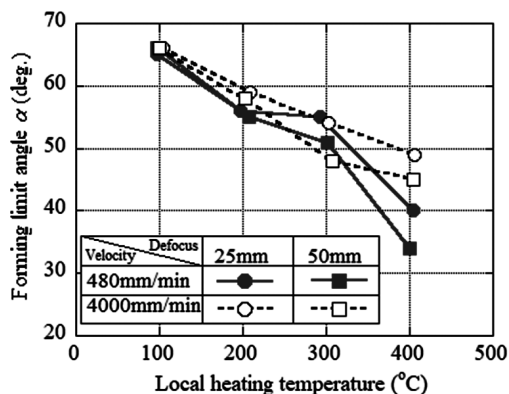
(6) 成形品の調査：触針式の形状測定装置あるいはデジタル画像に基づく非接触 3 次元形状測定システムにより成形品の形状を測定し、成形目標形状と実際の成形品形状の比較を行って形状誤差を調査した。

また成形品の斜面上部からワイヤカット放電加工により  $12\text{mm}\times 10\text{mm}$  程度の小片サンプルを切り出し、マイクロビッカース硬さ試験を行った。試験荷重は 50gf、保持時間は 10s とし、サンプル断面の板厚中心および加熱側 (レーザー照射側)、冷却側 (工具接触側)  $0.2\text{mm}$  の位置で 3 点ずつ硬さを測定し、それぞれの平均値を得た。

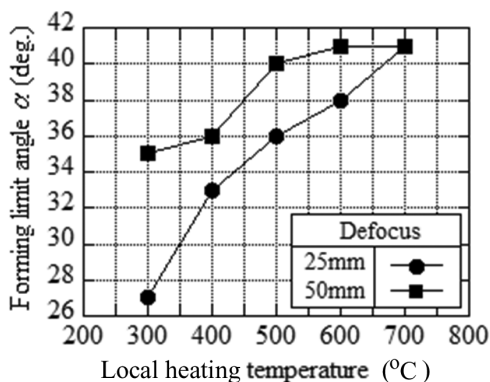
さらにサンプル断面の組織観察を行った。ピクリン酸 4.2g、酢酸 10ml、蒸留水 10ml、エタノール 70ml の混合液を腐食液として使用し、腐食時間 15s でエッチングを施し、結晶粒の光学顕微鏡観察を行った。

#### 4. 研究成果

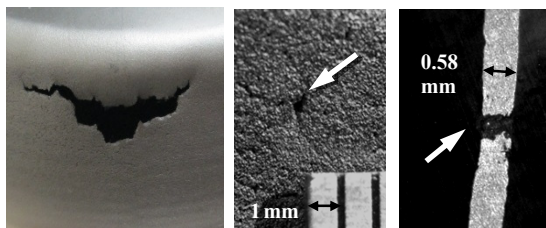
(1) 成形性：局所加熱温度と成形可能な最小の斜面傾斜角  $\alpha$  の関係を図 5 に示す。同図(a)は AZ31 合金板の正四角錐台成形実験結果、同図(b)は純チタン板の円錐台成形実験結果である。AZ31 合金板については、局所加熱温度が高いほど、デフォーカスが大きいほど最小斜面傾斜角が小さくなり成形性が向上することがわかる。また高温時 ( $400^{\circ}\text{C}$ ) には工具速度の影響が現れ、工具速度が遅いほど成形性が良い。この結果は図 2(a)に示した AZ31 材の材料特性の温度依存性から説明できる。一方、純チタン板の結果は AZ31 合金板とは逆の傾向を示し、局所加熱温度が高いほど最小斜面傾斜角が大きくなり成形性が



(a) AZ31 マグネシウム合金板・正四角錐台成形



(b) JIS1 種純チタン板・円錐台成形  
図5 成形可能な最小斜面傾斜角  $\alpha$



(a) Tearing (b) Pinhole  
図6 純チタン板における2種の成形失敗例

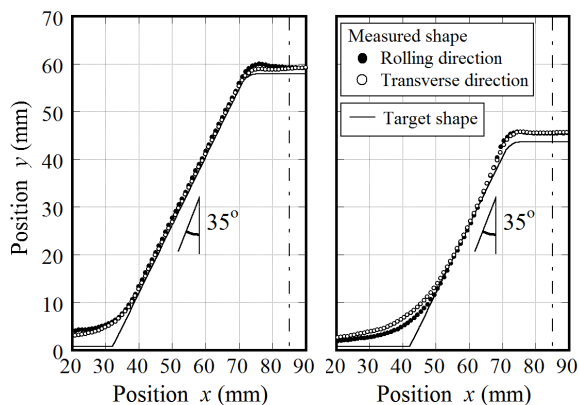
表1 純チタン板における2種の欠陥の発生状況

レーザー出力(W)	局所加熱温度(°C)	斜面傾斜角 $\alpha$ (°)	欠陥タイプ
90	300	26	Tearing
115	400	32	Tearing
140	500	35	Pinhole
195	600	37	Pinhole
220	700	40	Pinhole

※注：デフォーカスは25mm

悪化している。この結果は図2(b)に示したチタン材の材料特性の温度依存性と矛盾している。すなわち、延性が最低となる400°Cの方が、延性が高い高温時(600, 700°C)よりも良い成形性を示している。

純チタン板でこのような結果となったのは、高温成形時に微小孔欠陥が生じたためである。図6に純チタン板で観察された2種の成形失敗例を示す。同図(a)はき裂が開口し破断部が生じた例(Tearing)、同図(b)は一見す



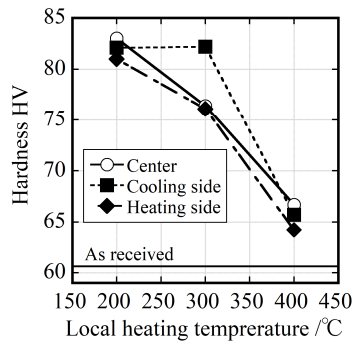
(a) 円錐台成形品 (b) 正四角錐台成形品

図7 AZ31 マグネシウム合金板における成形品形状測定結果の例(工具速度480mm·min<sup>-1</sup>, 斜面傾斜角35°, デフォーカス50mm, 局所加熱温度400°Cの場合)

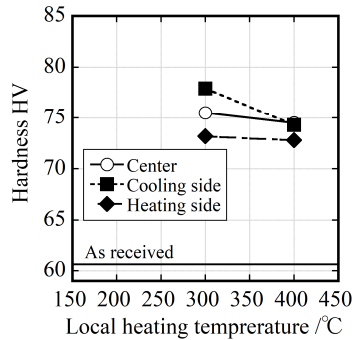
ると成形が成功したように見えるが一部に微小貫通孔が生じた例(Pinhole)であり、これらの欠陥の発生状況を表1にまとめて示す。この表から、レーザー出力が高く局所加熱温度が高い条件下で微小孔欠陥が生じることがわかる。つまり材料延性が高い高温時に微小孔欠陥が生じやすく、そのせいで高温時に成形性が悪化してしまうことになる。現時点では微小孔欠陥の原因とその対策を明らかにするには至っていない。

(2) 形状誤差：工具速度，斜面傾斜角，局所加熱温度，デフォーカスが同一の条件におけるAZ31 マグネシウム合金板の円錐台・四角錐台成形品の形状測定結果(圧延方向，圧延直交方向の中央断面)の例を図7に示す(紙面の制約のため半分のみ表示)。比較のため工具経路から算出される目標形状も重ねて示した。この結果から形状誤差には大別して(i) フランジ部の浮き上がり，(ii) 斜面部・フランジ部接続コーナーRの誤差，(iii) 頂上部・斜面部接続コーナーの上方への突出，(iv) 頂上部の浮き上がりの4要素がある。これらのうち(i)は成形中の工具からの負荷によるフランジたわみなどに起因するものであり，(ii)はコーナー部の曲げにおいて金型による拘束がないため曲げ半径が大きくなることが原因であると考えられる。(iii)は成形工具の最終周回時における張出し変形の影響が残ったものであろう。(iv)の原因は(i)と同様であると思われる。斜面傾斜角  $\alpha$  が大きいほど、またデフォーカスが大きいほどその値が小さくなる傾向が見られた。以上の4要素は円錐台・四角錐台の双方で見られるものである。

ところで、四角錐台では上記4要素に加えて、本来平面であるはずの斜面部が成形品内側へわずかながら凹むという形状不良が見られた(図7(b)を詳細に見ると直線であるべき斜面部が下に凸の曲線となり、一部はわずかながら目標形状線の内側に入っていることがわかる)。この形状不良は有限要素解析

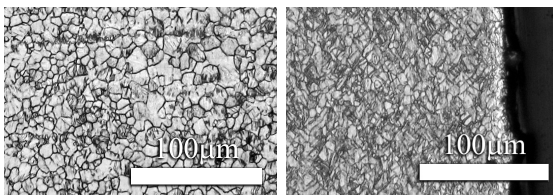


(a) 工具速度  $480\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $50\text{mm}$



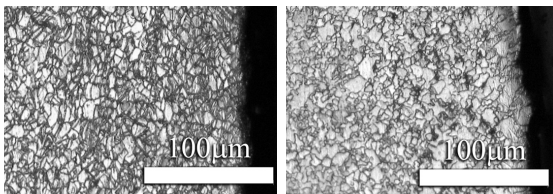
(b) 工具速度  $4000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $25\text{mm}$

図 8 AZ31 マグネシウム合金板の円錐台成形品から切り出されたサンプルのマイクロビッカース硬さ試験結果 (斜面傾斜角  $55^\circ$ )



(a) 受入材

(b) 局所加熱温度  $200^\circ\text{C}$

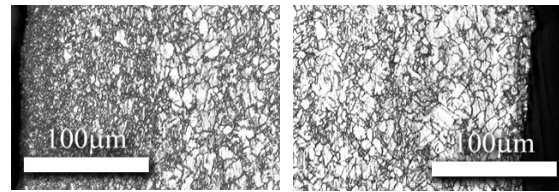


(c) 局所加熱温度  $300^\circ\text{C}$  (d) 局所加熱温度  $400^\circ\text{C}$

図 9 AZ31 マグネシウム合金板の受入材および円錐台成形品から切り出されたサンプルの加熱側表面近傍における組織観察写真 (工具速度  $480\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 斜面傾斜角  $55^\circ$ , デフォーカス  $50\text{mm}$ , 倍率 $\times 1000$ )

でも再現されるものである。現時点ではこの形状不良を解消するには至っていない。

(3) 成形品の硬さ: AZ31 合金板の円錐台成形品 (斜面傾斜角  $55^\circ$ ) から切り出されたサンプルの硬さ試験結果の例を図 8 に示す。同図 (a) は工具速度  $480\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $50\text{mm}$  の場合, 同図 (b) は工具速度  $4000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $25\text{mm}$  の場合の局所加熱温度とビッカース硬さの関係である。すべての条件



(a) 冷却側

(b) 加熱側

図 10 AZ31 マグネシウム合金板の円錐台成形品から切り出されたサンプルの加熱側・冷却側両面における組織観察写真 (工具速度  $4000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , 斜面傾斜角  $55^\circ$ , デフォーカス  $25\text{mm}$ , 局所加熱温度  $300^\circ\text{C}$ , 倍率 $\times 1000$ )

において成形後の硬度は成形前の受入材硬さ ( $60.6\text{HV}$ ) より高く, 加工硬化していることがわかる。また局所加熱温度が高いほど硬化量は小さくなる。局所加熱温度の上昇に伴う硬さの低下傾向はデフォーカスが大きいほど, 工具速度が遅いほど顕著になるようである。とくに図 8(a) の工具速度  $480\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $50\text{mm}$  の場合, 局所加熱温度  $200^\circ\text{C}$  では  $82\text{HV}$  前後まで硬化しているのに対して,  $400^\circ\text{C}$  の場合は  $65\text{HV}$  前後まで硬さが低下しており, 受入材に近い硬さにまで軟化している。

加熱側と冷却側を比較すると, ばらつきはあるが全体的に後者の方が若干高硬度となる傾向が見られる。また局所加熱温度の上昇に伴う硬さの低下傾向は加熱側よりも冷却側の方でより顕著になるようである。

(4) 成形に伴う組織変化: 図 9 は成形前の AZ31 試験片, および工具速度  $480\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $50\text{mm}$ , 斜面傾斜角  $55^\circ$  における円錐台成形品の加熱側 (レーザー照射側) 表面近傍の組織写真である。同図 (a) が成形前の試験片の組織であり, 全体的に丸みを帯びた結晶粒で平均粒径  $10\mu\text{m}$  程度のおおむね均一な組織となっている。一方, 同図 (b) に示す局所加熱温度  $200^\circ\text{C}$  での成形品の組織は全体的に結晶粒サイズが小さくなるとともに丸みを帯びた結晶粒は見られなくなり, 最大主ひずみ方向 (成形品斜面方向) に引き伸ばされたような歪んだ形の粒が多くなっている。ところが局所加熱温度が  $400^\circ\text{C}$  (図 9(d)) になると大きく変形した粒が見られなくなるとともに丸みを帯びた結晶粒が現れ, 部分的に粒成長が生じている様子が見受けられる。

上記のような組織変化は動的再結晶による結晶粒微細化とその後の粒成長に起因するものと考えられる。局所加熱温度が高くなるほど粒成長が進行して丸みを帯びた大きな結晶粒が増加し (図 9(d) 参照), これに伴って成形品の硬さが低下する (図 8(a) 参照) のと推察される。

図 10 は工具速度  $4000\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , デフォーカス  $25\text{mm}$ , 局所加熱温度  $300^\circ\text{C}$ , 斜面傾斜角  $55^\circ$  における AZ31 円錐台成形品について加熱側 (レーザー照射側) および冷却側 (工具接触側) 表面近傍の組織を比較したものであ

る。加熱側に比べて冷却側表面近傍では結晶粒が著しく微細化されていることがわかる。冷却側では粒成長が進行する前に冷却されてしまうため微細化された組織が残り、このことが図8に示したような加熱側・冷却側の硬度差の原因ではないかと考えられる。

#### <引用文献>

- ① R. Hino, F. Yoshida, N. Nagaishi & T. Naka: Incremental sheet forming with local heating for lightweight hard-to-form material, *Int. J. Mod. Phys. B*, **22**-31/32 (2008), 6082-6087.
- ② R. Hino, N. Nagaishi, Y. Yamamoto, T. Naka & F. Yoshida: Incremental forming with local heating for aluminum-magnesium alloy sheet, *Steel Res. Int.*, **81**-9 (2010), 946-949.
- ③ R. Hino, K. Kawabata & F. Yoshida: Incremental forming with local heating by laser irradiation for magnesium alloy sheet, *Procedia Engineering*, **81** (2014), 2330-2335.

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計2件)

- ①篠崎賢二, 山本元道, 真鍋幸男, 加藤昌彦, 日野隆太郎, 鈴木裕之, 佐々木元, 松木一弘, 山田啓司: 広島大学 Hi-NoM によるイノベーション創出の取組み, 塑性と加工, **58**-682 (2017), 1014-1020. (査読無)
- ②日野隆太郎: レーザー局所加熱インクリメンタルフォーミング, 素形材, **57**-10, (2016), 31-35. (査読無)

##### 〔学会発表〕(計6件)

- ①松本純宜, 日野隆太郎, 吉田総仁: レーザ局所加熱インクリメンタル成形後のマグネシウム合金板の組織と機械特性, 平成30年度塑性加工春季講演会, 2018年5月31日～6月2日, 東京都.
- ②A. Eka Siwi, R. Hino, K. Murao & F. Yoshida: Formability of Titanium Sheet in Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation, 第68回塑性加工連合講演会, 2017年11月10日～11日, 福井市.
- ③A. Eka Siwi, K. Murao, R. Hino & F. Yoshida: Incremental Forming with Local Heating by Laser Irradiation for Titanium Sheet, 第67回塑性加工連合講演会, 2016年10月21日～23日, 日本工業大学.
- ④栗澤拓也, 川畑慶太, 日野隆太郎, 吉田総仁: マグネシウム合金板のレーザー援用局所加熱インクリメンタルフォーミングにおける成形特性, 第67回塑性加工連合講演会, 2016年10月21日～23日, 日本工業大学.
- ⑤村尾康平, 栗澤拓也, 日野隆太郎, 吉田総仁: レーザ局所加熱インクリメンタルフォーミングによるチタン板の成形, 日本機械学会中国四国支部第54期総会・講演会, 2016年3月9日, 愛媛大学.
- ⑥栗澤拓也, 村尾康平, 日野隆太郎, 吉田総

仁: レーザ局所加熱インクリメンタルフォーミングにおける成形品の形状精度, 日本機械学会第23回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015), 2015年11月13日～15日, 広島大学.

##### 〔その他〕

高機能難加工材の製造・先端加工システム開発による革新的ものづくり研究拠点 Hi-NoM ホームページ  
<http://hinom.hiroshima-u.ac.jp/Hi-NoM/Research/Research.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

日野 隆太郎 (HINO, Ryutaro)  
広島大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10283160

##### (2) 研究協力者

吉田 総仁 (YOSHIDA, Fusahito)  
広島大学・大学院工学研究科・特任教授  
研究者番号: 50016797

川畑 慶太 (KAWABATA, Keita)  
村尾 康平 (MURAO, Kohei)  
栗澤 拓也 (KURISAWA, Takuya)  
Ahmad Eka Siwi (Ahmad Eka Siwi)  
松本 純宜 (MATSUMOTO, Junki)  
佐藤 敦史 (SATO, Atsushi)