

レーザーアシスト曲げに関する研究

静岡大学工学部 機械工学科

教授 田中 繁一

(平成 25 年度一般研究開発助成 AF-2013024)

キーワード：レーザー, 曲げ, 難加工材

1. 研究の目的と背景

チタン合金やマグネシウム合金は、室温での延性が不足するために熱間あるいは温間成形されるが、加熱装置や特殊なハンドリング装置等が必要となる。この状況は、板金の曲げ加工においても同様で、これらの難加工板材の成形を成功させるのは容易でない。これに対して、レーザー局所加熱（図 1）を利用するアイデアが提案され¹⁾²⁾、近年には実験的試みも報告されつつある³⁾。

本報告では、低延性材料の曲げへの線状レーザー局所急速加熱の効果を確認するとともに、高変形抵抗・延性材料の曲げ荷重の低減効果等を実験的に検討した。加えて、2次元熱弾塑性 FEM 解析を行い、素材の変形挙動に関して基礎的な考察を行った。また、加熱スケジュールが荷重やスプリングバックに及ぼす影響を検討した。さらに、素材とパンチやダイス間の熱伝達現象を考慮してその影響を考察した。

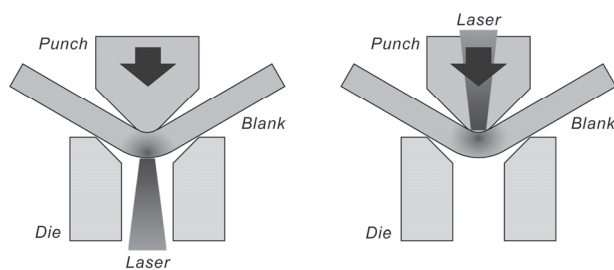


図 1 レーザーアシスト曲げの概要

2. レーザーアシスト曲げ実験

2.1 実験装置

実験に使用したレーザーアシスト曲げ装置の概要を図 2 に示す。また、図 3 と 4 はそれぞれパンチとダイス形状の詳細とレーザー照射のための光学系である。パンチ刃先角は 88° で、先端 R は 0.6mm である。ダイの V 幅は 8mm 、 V 角度は 88° で、肩 R は 1.5mm であり、中央にレーザー光を通すための幅 4mm 、長さ 50mm のスリットが開いている。

レーザー光源（表 1）には波長 $980 \pm 10\text{nm}$ 、最大出力 110W のファイバー付き半導体レーザー（nLight corp., Pearl™ Module）を使用した。ファイバーからの出射光はコリメータ（平凸レンズ）により直径 10mm の平行光に変換され

た後、ミラーで光路を 90° 度曲げた後、シリンジカル・レンズにより長さ 10mm のライン光に整形される。このレーザー光を素材下面に照射して局所ライン加熱を行う。

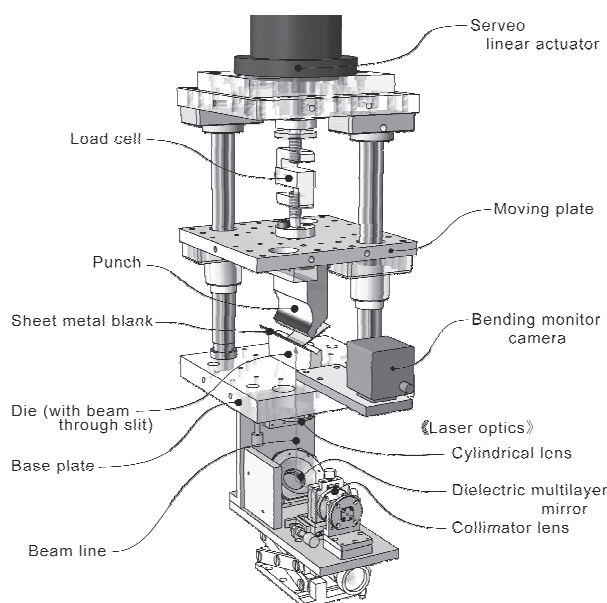


図 2 レーザーアシスト曲げ実験装置

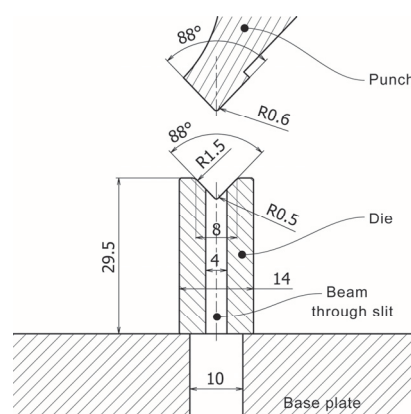


図 3 曲げパンチおよびダイス形状

表 1 レーザ光源

| Laser module | nLight corp., Pearl™ Diode Module |
|------------------------|---|
| Wavelength : λ | $980 \pm 10 \text{ nm}$ |
| Maximum power : P | 110 W |
| Delivery fiber optics | $600 \mu\text{m dia.}, 0.18 \text{ N.A.}$ |

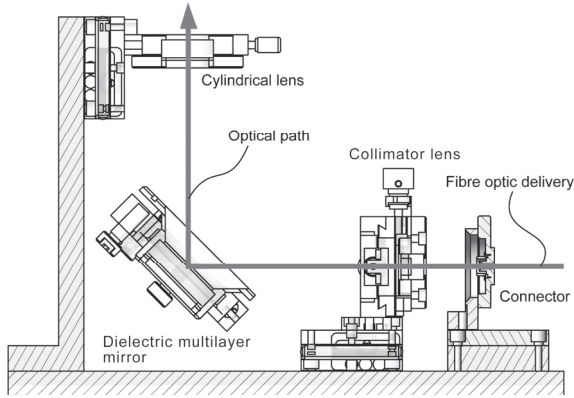


図4 レーザ光学系

2.2 試験片

使用した材料は、マグネシウム合金 AZ31、チタン合金 Ti-6Al-4V、およびステンレス鋼 SUS304 で、試験片の板厚は 1mm で、幅は 10mm である。また、AZ31 と Ti-6Al-4V については圧延方向に対して平行と垂直な試験片を用意した。

2.3 実験結果

2.3.1 低延性材料のレーザアシスト曲げ

事前に、レーザ照射裏面に素線径 0.32mm の K 型熱電対を張り付けて、レーザ照射による各試験片の温度を計測を行った。レーザアシスト曲げ実験では、各材料の高温引張試験から得られた延性が十分得られる温度への昇温に必要な出力を設定した。

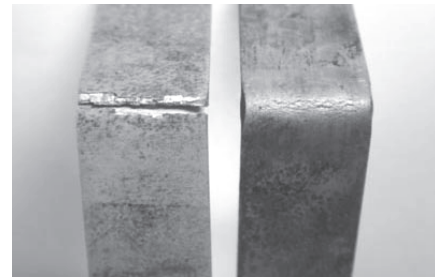
図 5 は、マグネシウム合金板 (AZ31, $t=1$) の曲げ加工例で、通常の曲げでは同図(a)のように加工初期に破断する。これに対してレーザアシスト曲げ ($P=67.3W$) を適用すると、同図(b)のように約 90° の曲げが成功する。

図 6 は、チタン合金板 (Ti-6Al-4V, $t=1$) の曲げ加工例で、通常の曲げでは同図(a)のように破断する。これに対してレーザアシスト曲げ ($P=67.3W$) を適用すると、同図(b)のように約 90° の曲げが成功する。

図 7 と 8 は、それぞれのレーザアシスト曲げの加工力である。図 7 のマグネシウム合金では、曲げ線が圧延方向と平行と垂直な場合の結果をそれぞれ黒色と灰色で示す。 $P=19.8W$ 低出力では、曲げ線が圧延方向と平行の場合に曲げが失敗するが、 $P=67.3W$ 以上では両試験片とも曲げが成功する。加工力は、曲げ線が圧延方向と平行の場合に高い。一方、図 8 のチタン合金では、圧延方向の相異により加工力に大きな差が生じ、曲げ線が圧延方向と平行の場合に加工力も高い。

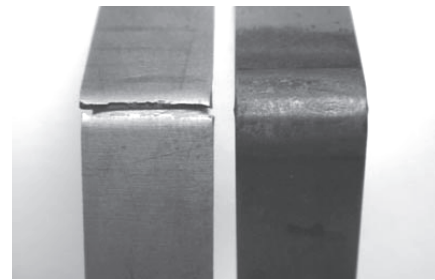
2.3.2 高変形抵抗材料のレーザアシスト曲げ

図 9, 10 に、ステンレス鋼 (SUS304, $t=1$) に対してレーザアシスト曲げを適用した場合の最大荷重と加工後の製品曲げ角を示す。出力 P の増大とともに荷重は減少し、 $P=67.3W$ では 35.4% 低減している。曲げ角も、 P の増大とともにスプリングバックが減少してパンチ角に近づき、最終的には若干パンチ角により小さくなっている。



(a) without laser-heating (b) with laser-heating
($P = 67.3W$, $2a \approx 1mm$, $b \approx 10mm$)

図5 曲げ試験片 (Blank: AZ31, $t = 1.0$ mm, $w = 10$ mm)



(a) without laser-heating (b) with laser-heating
($P = 67.3W$, $2a \approx 2mm$, $b \approx 10mm$)

図6 曲げ試験片 (Blank: Ti-6Al-4V, $t = 1.0$ mm, $w = 10$ mm)

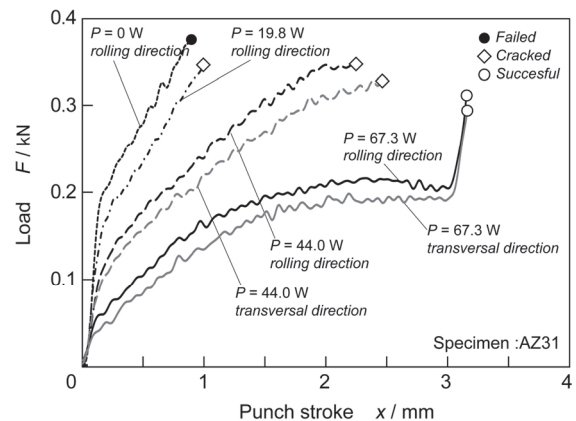


図7 レーザアシスト曲げの曲げ荷重
(Blank: AZ31, thickness: 1mm \times width: 10mm,
Spot size: $2a \times b \approx 2mm \times 10mm$)

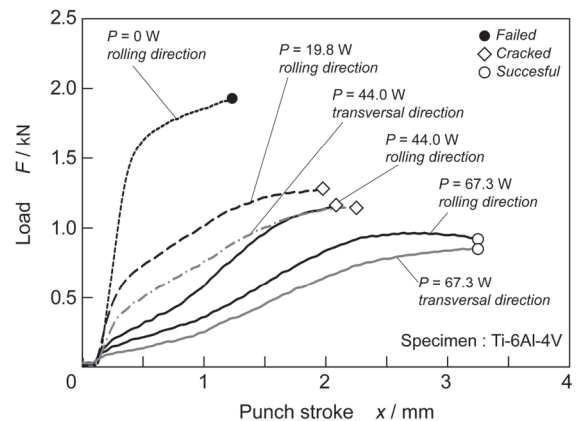


図8 レーザアシスト曲げの曲げ荷重
(Blank: Ti-6Al-4V, thickness: 1mm \times width: 10mm,
Spot size: $2a \times b \approx 1mm \times 10mm$)

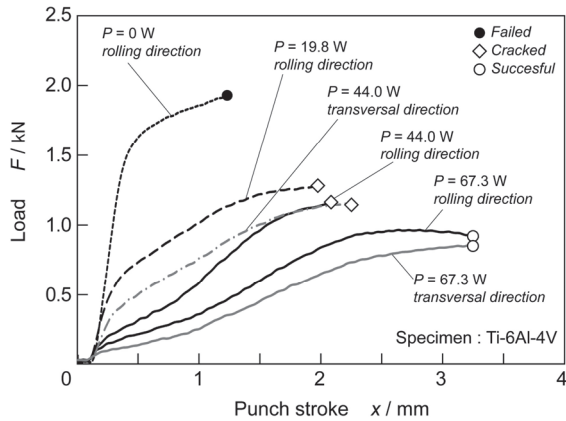


図9 レーザアシスト曲げの曲げ荷重
(Blank: SUS304, thickness: 1mm × width: 10mm,
Spot size: 2a × b ≐ 2mm × 10mm)

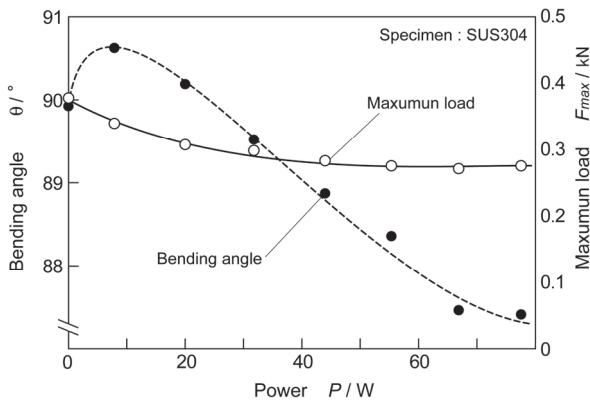


図10 レーザアシスト曲げの曲げ角
(Blank: SUS304, thickness: 1mm × width: 10mm,
Spot size: 2a × b ≐ 2mm × 10mm)

3. レーザアシスト曲げの2次元 FEM 解析

3.1 計算モデル

FEM 解析には、商用ソフトウェア MARC2005R3 を用いた。図 11 は計算に用いたメッシュモデルであり、対称性から 1/2 モデルを解析した。また、素板は板厚方向に 10 層のソリッド要素で分割している。熱伝導解析では、素板から空気、素板からダイス、および素板からパンチへの熱伝達を計算している。素板と工具間の熱伝達係数は、素板上の 5 点で実測した温度とその計算値との残差が最小となるように決定した。パンチとダイスでは、弾性体として熱伝導を連成解析している。

表 3 は、計算に用いた材料特性値で、ステンレス鋼を想定しており、参考文献を参考にして熱依存性を考慮したが、ひずみ速度依存性は考慮していない。表 4 はパンチとダイスの熱特性で温度依存性は考慮していない。

図 12 は、パンチ動作およびレーザー加熱のスケジュールを示している。パンチは一定速度で加工し、下端で一定時間保持した後に除荷する。一方、レーザーは一定出力 P_l で照射するが、計算の安定性から前後に短い遷移区間を設けてある。

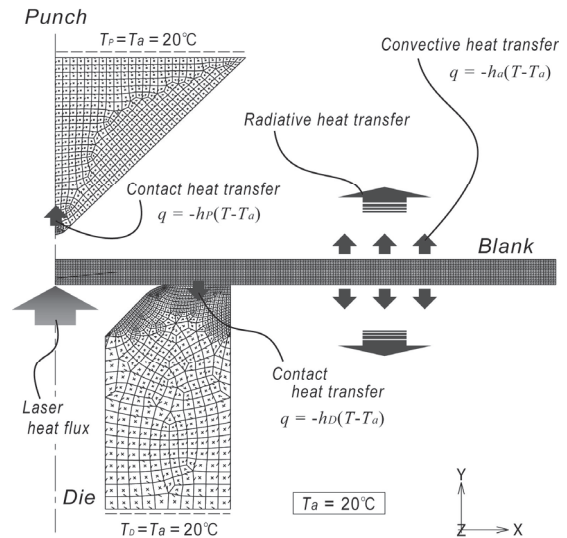


図11 メッシュモデル

表2 計算条件

| | | |
|--|--------------|--------------------|
| Power : P | 0 - 100 | W/10mm |
| Line spot width: $2a$ | 2 | mm |
| Ambient temperature: T_a | 20 | °C |
| Heat transfer coefficient between blank and air : α | 10 | W/m ² K |
| Heat transfer coefficient between punch and blank : h_p | 2000 | W/m ² K |
| Heat transfer coefficient between die and blank : h_d | 2000 | W/m ² K |
| Punch speed : v_p | -1.0 - -10.0 | m/s |

表3 素板の諸特性

| | | |
|---|--------------|-----------------|
| Young's modulus : $E^{(4),(5)}$ | 103 - 193 | GPa |
| Poisson ratio: $\nu^{(4),(5)}$ | 0.29 - 0.362 | |
| Thermal expansion : $\alpha^{(6)}$ | 13.6 - 18.9 | K ⁻¹ |
| Heat conductivity : $\lambda^{(7),(8)}$ | 8.36 - 13.8 | kW/m·s |
| Specific heat : $c^{(9),(10)}$ | 0.50 - 0.64 | kJ/kg·K |
| Yield stress : $\sigma_y^{(11)}$ | 76 - 270 | MPa |

表4 パンチ・ダイスの諸特性

| | | |
|-------------------------------|------|---------|
| Young's modulus : E | 205 | GPa |
| Poisson ratio: ν | 0.30 | |
| Heat conductivity : λ | 53 | W/K·m |
| Specific heat : c | 0.46 | kJ/kg·K |

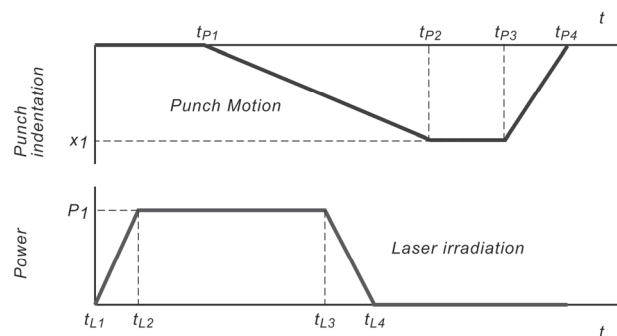


図12. レーザアシスト曲げスケジュール

3.2 ビームモデル

計算においては、レーザは2次元ガウシアンビームとし、次式を熱流束境界条件として用いた。

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{2x^2}{a^2}\right) \times \cos(\theta(t, x)) \quad (1)$$

ここで、 θ は成形中の素板のレーザ照射面の法線方向を表し、その方向余弦により熱流束を修正している。

3.3 計算結果

3.3.1 成形プロセス、曲げ荷重およびスプリングバック量

図13は、 $P=40\text{W}/10\text{mm}$ のレーザで $t_{L1}=0\text{s}$ から $t_{L4}=23\text{s}$ まで加熱を行い、パンチ降下を $t_{P1}=14\text{s}$ に開始した場合の計算結果である。約14sec程度の加熱により素材中央部は700°C程度に局所加熱される。成形中には曲げコーナー部の温度は500°C以下に下がり18.04sで加工が完了する。

図14は、様々なスケジュールで成形を行った場合の最大曲げ力とスプリングバック量を示している。レーザ加熱を併用するプロセスでは従来の曲げにおける曲げ荷重は半分以下であり、その結果、スプリングバック量も半分以下と小さい。出力が大きいとスプリングバック量も1/3程度まで小さくなる。

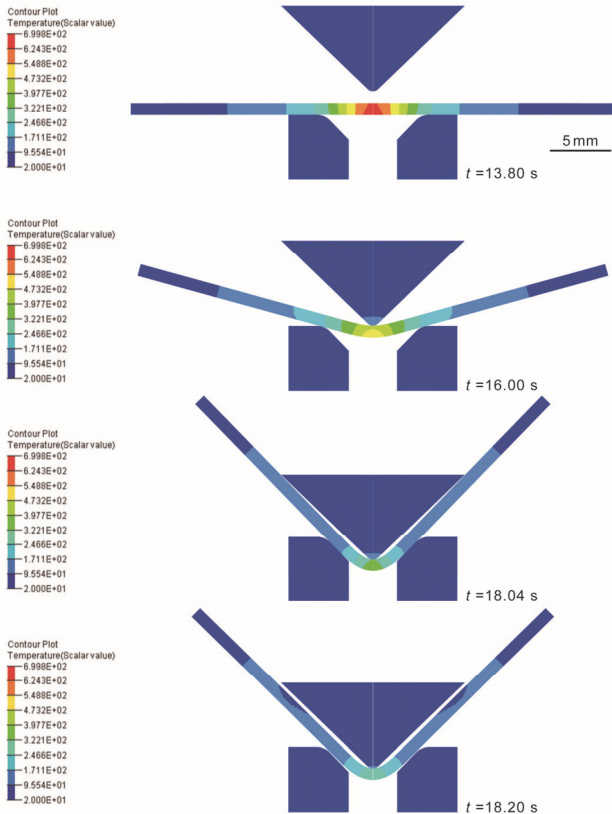


図13. 計算結果 (温度分布)
(Blank: SUS304, 1mm(thickness)×60mm(full length),
Spot width: $2a=2\text{mm}$, Power: $P=40\text{ W}/10\text{mm}$)

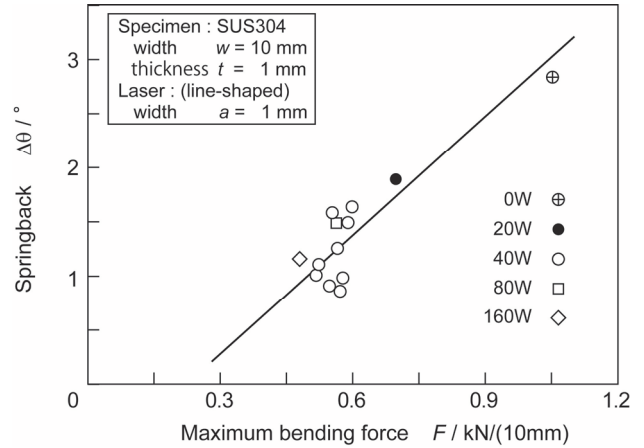


図14. スプリングバック
(Blank: SUS304, 1mm(thickness)×30mm(half length))

3.3.2 ダイスおよびパンチへの熱伝達現象

図15および16は、素板とダイス間、および素板とパンチ間の熱伝達の影響を考察した結果である。各図(a)は熱伝達係数を $h_D = 2000\text{ [W/m}^2\text{K]}$ と設定して熱伝達を考慮したシミュレーションの結果で、(b)は考慮しない場合の結果である。材料からパンチ・ダイスへの熱伝達による損失は非常に大きく、図15(b)では容易に1000°C程度に昇温できるが、実際には(a)のように、工具接触により瞬時に500°C程度の温度降下が生じるとともに、工具(パンチ)側の温度がわずかに上昇する。

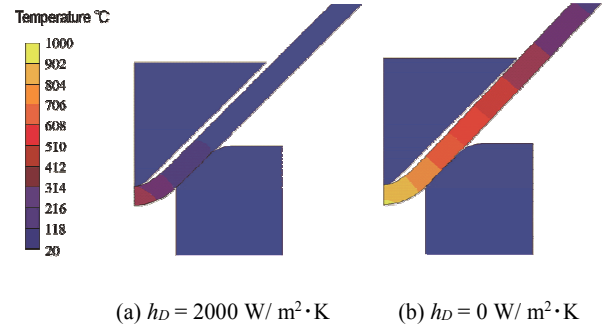


図15. 計算結果
(Blank: SUS304, 1mm(thickness)×30mm(half length),
Spot size: $a=1\text{mm}$, Power: $P=40\text{ W}/10\text{mm}$)

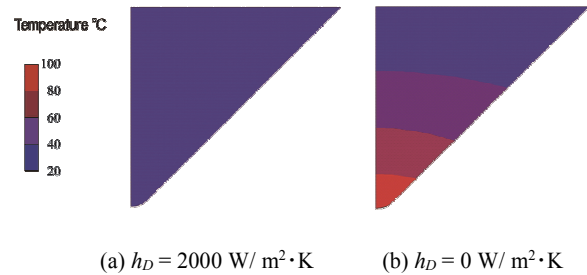


図16. 計算結果
(Blank: SUS304, 1mm(thickness)×30mm(half length),
Spot size: $a=1\text{mm}$, Power: $P=40\text{ W}/10\text{mm}$)

4. 曲げ部の熱影響

図 17 は、レーザアシスト曲げ成形された製品のコーナー部の組織を EBSD で観察した例である。これらの EBSD 解析像から得られる素板の結晶粒径分布は $9\mu\text{m}$ にピークをもち $5\text{-}15\mu\text{m}$ に広がる分布を示す。一方、 88.5 [W/10mm] でレーザアシスト曲げ成形された組織は $13\mu\text{m}$ にピークをもち $7\text{-}22\mu\text{m}$ に広がる分布を示し、とくに照射面近傍の A 部でこの傾向が明瞭であり、若干の熱影響が存在する。

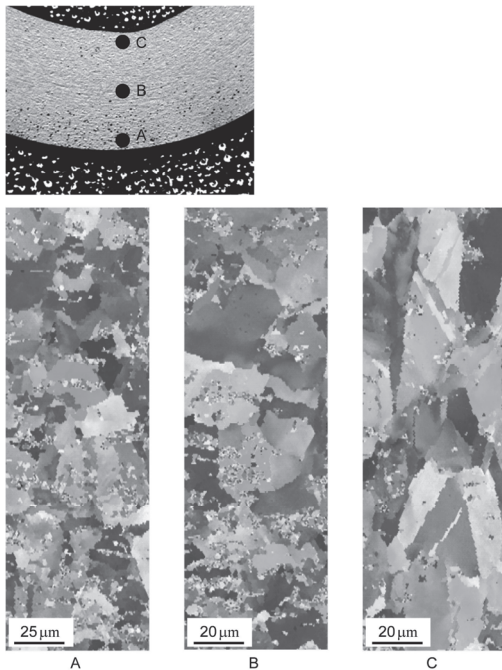


図 17. レーザアシスト曲げ部の微細組織
(Blank: SUS304, 1mm(thickness)×10mm(width)×50mm(length),
Spot size: $2a \times b = 2\text{mm} \times 20\text{mm}$, Irradiation time: $T=10\text{ s}$,
Power: $P=88.5\text{ W/10mm}$)

5. まとめ

低延性材料の曲げへの線状レーザ局所急速加熱適用の効果を確認するとともに、高変形抵抗・延性材料の曲げ荷重の低減効果を実験的に検討した。加えて、2次元熱弾塑性 FEM 解析を行い素材の変形挙動に関して基礎的な考察を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- マグネシウム合金板 (AZ31: $t=1, w=10$) やチタン合金板 (Ti-6Al-4V: $t=1, w=10$) は、室温では曲げ加工は不可能であるが、 67.3W の線状レーザ加熱を併用すれば、 90° 曲げが可能となる。
- ステンレス鋼 (SUS304: $t=1, w=10$) に対して、 67.3W の線状レーザ加熱を併用すれば、加工荷重を 35.4% 低減することができる。
- 2次元 FEM 解析によれば、レーザアシスト曲げにより最大曲げ荷重の低下とともに、スプリングバック量も $1/3$ 程度にまで小さくなる。
- レーザアシスト曲げ成形された製品のコーナー部では結晶粒径が、素板の $9\mu\text{m}$ に対して $13\mu\text{m}$ 程度に若干粗大化する。

参考文献

- 1) 榎アマダ, 特開平 5-96329, (1991).
- 2) トルンプマシーネンオーストリア, 特表 2002-507153, (2002).
- 3) F. Bammer, et.al.: Hindawi Publishing Corporation Advances in Optical Technologies, Vol.2011, Article ID 321807.
- 4) Me. Sistaninia, Ma. Sistaninia, H. Moeanodini: Computational Material Science, 45 (2009), 480-488.
- 5) S.S. Lee, U-S. Min, B. Ahn and S.H. Yoo, J. Materials Science, 33 (1998), 687.
- 6) H.M. Ledbetter, J. Applied Physics, 52-3, March (1981).
- 7) N. Yamada, M. Okaji and Y. Miki, The Fourth Asian Thermophysical Properties Conf., Tokyo, (1995), 441.
- 8) L. Filoni and G. Rocchini, High Temperatures-High Pressures, 19 (1987), 381.
- 9) R.P. Tye, R.W. Hayden, S.C. Spinney, High Temperatures -High Pressures, 4 (1972), 203.
- 10) NIST Cryogenic Technologies Group, Bolder Co; W. Poessnecker, U. Gross, High Temperatures-High Pressures, 34 (2002), 1.
- 11) R. Venturi, and R.D. Seibel, DRI Rept. 1023 (1959), 1-31.
- 13) J.B. Conway, R.H. Stentz and J.T. Berling, Fatigue, Tensile and Relaxation Behavior of Stainless Steels, Technical Information Center, USAEC (1975), 213.