

3次元レーザフォーミングにおける被加工材の変形メカニズム —大変形を受けたフレームの修復技術への応用—

兵庫県立大学 大学院工学研究科機械系工学専攻
准教授 布引雅之
(平成23年度一般研究開発助成 AF-2011219)

キーワード：レーザフォーミング 変形修復 ステンレス鋼板

1. 研究の目的と背景

日本において金属薄板のプレス工業はその販売額が1兆円/年を20年以上維持しており、日本の大きな基幹産業であるといえる¹⁾。近年、工業用材料として使用される金属薄板のプレス加工に求められる形状精度はますます高くなっており、スプリングバックによって生じる形状誤差を抑制あるいは矯正する方法が望まれている。またステンレス鋼板が多く用いられている電車や自動車の車輻外板が外力により凹状に塑性変形した場合には一旦外板を取り外し内側から叩き出す必要があり修復に要する時間とコストが増加するという問題がある。よって外板を取り外すことなく塑性変形部を修復する新たな手法が望まれている。筆者らは上記のような場合にレーザフォーミングが有効であると考えた。レーザフォーミングは板材表面にレーザ光を照射し、局所的な熱応力によって塑性変形させて板を曲げる加工法である。難波ら²⁾によってレーザフォーミングの加工方法が報告されてから、国内外においてさまざまな研究がなされてきた³⁻⁹⁾。その内容は変形メカニズムの解明・薄板の曲げ・パイプ曲げ・三次元形状の作成など多岐にわたっている。本研究室においてもCO₂レーザを用いた純チタン板やマグネシウム合金板のレーザフォーミングを行ってきた¹⁰⁻¹³⁾。しかし、それらの多くは平板の曲げ加工であり、レーザフォーミングの三次元形状への適用例は未だ少なく、レーザフォーミングによる加工の新たな分野の開拓・基礎研究を行うことが必要であると考えた。

そこで、筆者らはレーザフォーミングを用いて、工業製品として広く使用されているSUS304板に付けられた直径20mm深さ1.5mm程のすり鉢状の塑性変形部の形状を修復する方法を提案する。レーザフォーミングにより外板を取り外すことなく塑性変形部を修復できれば修理等にかかる時間とコストを大幅に低減できる。また、技量が必要である人の手による板金作業に代わってレーザ加工機による自動化が可能になれば、修正作業が簡便に行えると考えられる。

2 実験方法

2.1 塑性変形部作成方法

図1(a)に示すように100mm×100mm×1mmのSUS304材の中央に直径約20mm・深さ1.5~1.6mmのすり鉢状の塑性変形部を作成した。試料の下に直径22mmの穴を開けたSK材ブロックを敷き、半径10mmの鋼球をプレス機に設置して、約1kNの押し付け荷重で押し付けた。試料は曲げ応力と引張り応力を受けて変形する。ただし、図1(c)に示すように、塑性変形部の外周の部分領域は主に曲げにより、鋼球が押し付けられている中心部付近は主に引張りによって変形していると考えられる。試料は表面と裏面に生じた伸び(引張り塑性ひずみ)の差で曲がっているため、塑性変形部を修復するには、表面と裏面のひずみを均衡させるとともに引張りひずみを解消する必要がある。

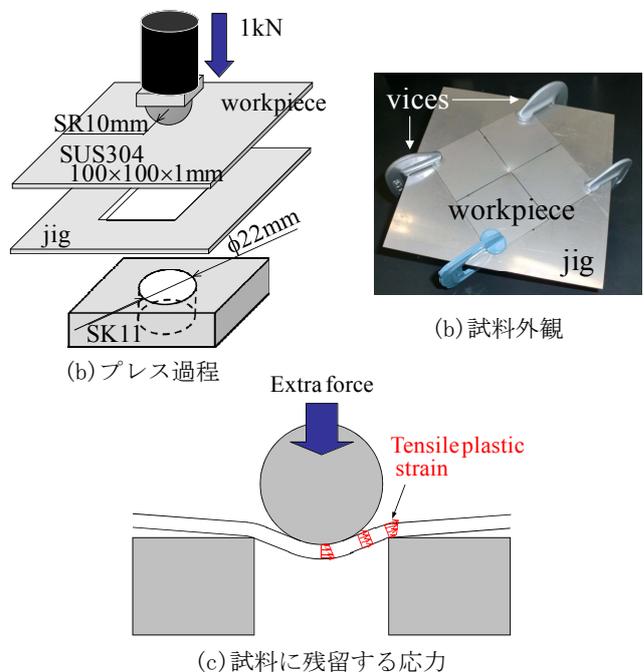


図1 塑性変形部作成方法

2.2 レーザフォーミングによる形状回復実験

本研究ではCO₂レーザ加工機を用いて、厚さ1mmのSUS304板へレーザフォーミングを施し、形状の修復を図

った。図2のように、照射前後の試料形状の形状をレーザ変位計を用いて測定し、図3の中心部変位量(d1-d2)を回復量と定義し、回復率(d1-d2)/d1でレーザフォーミングの効果の評価する。すり鉢状の塑性変形部を修復するために、図4のような複数の同心円に沿ってレーザを走査させる。この円の1つ1つを経路と呼び、外側から順番に経路1、経路2、…とする。形状回復処理においては外側の経路から順番に、内側の経路へと、レーザフォーミングを行っていく。デフォーカス量を14mm(スポット直径1.98mm)に固定し、1経路に対して送り速度5mm/secでレーザを5周走査させ、その後、乾燥空気をガス圧0.25kPaで吹き付けながら送り速度5mm/secで5周走査させる。この加熱5周・冷却5周を1セットとして照射回数を設定する。レーザ照射条件が曲げ挙動に及ぼす影響、各同心円へのレーザ照射後に冷却過程を挿入する効果について検討した。冷却においては乾燥空気を同心円上に吹き付けた。

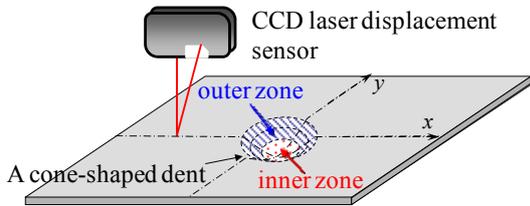


図2 塑性変形部の形状計測方法

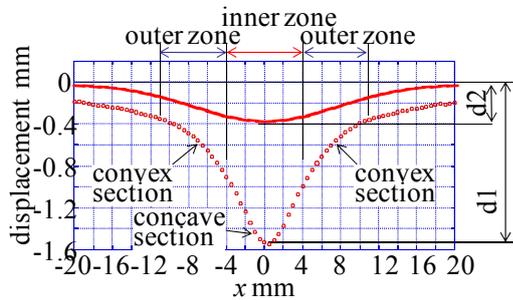


図3 塑性変形部の形状と回復率の定義

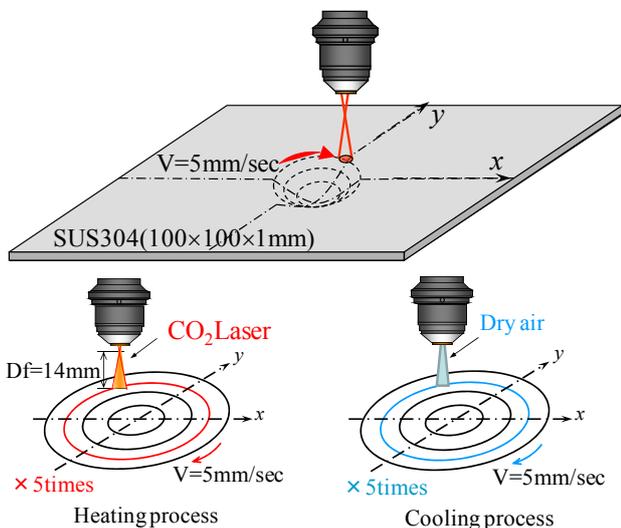


図4 レーザフォーミングによる形状回復手法

3. 実験結果

3.1 塑性変形部外周部へのレーザフォーミング

100mm×100mm×1mmのSUS304材に生成したすり鉢形状の凹みをレーザ変位計を用いて測定し、次に表1に示す出力300Wのレーザを用いて凹みにレーザフォーミングを適用した後、再び形状を測定することを繰り返し、レーザフォーミングの効果を検討した。図5に円形照射における塑性変形部の回復過程を示している。図中の●印はレーザ回復処理を行う前の表面の形状である。レーザ照射前に最大深さが1.42mmであった塑性変形部に対して、外側の同心円から内側の同心円へレーザフォーミングを施すことで、最終的に最大深さは0.23mmへ減少し、形状は84%回復した。

本実験では温度勾配メカニズム(TGM)で試料が変形するようにレーザ照射条件を設定しており、レーザが照射された部分は上に反るように変形する。そのため変形部は周辺を巻き込んで中央の凹部を持ち上げるようとする。塑性変形部の外側から内側に向けて順にレーザを照射すると共に試料につけられた凹みが周辺から徐々に回復していくことを確認した。

表1 レーザ照射条件1(P=300W)

scanning paths	1	2	3	4	5
diameter of scanning path	φ20	φ17	φ14	φ11	φ8
power	300W				
beam diameter	φ1.98				
heating-cooling cycles	3 sets				

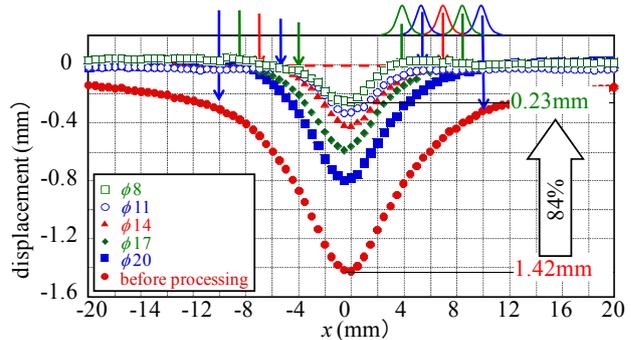


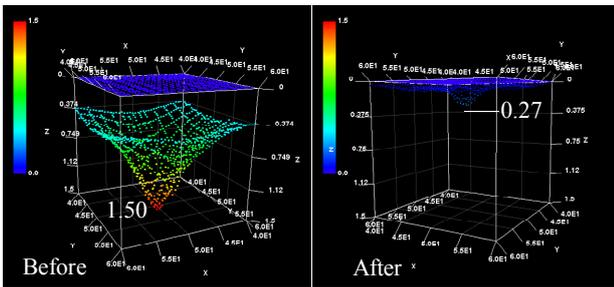
図5 レーザフォーミングによる形状回復過程 (P=300W)

次に表2に示す出力350Wのレーザを用いて形状回復を行った際のレーザフォーミング前後における塑性変形部全体形状を示す。図6(a)はレーザフォーミング前の試料形状である。図6(b)はレーザフォーミング後の試料形状である。図は試料中心部(20mm×20mm)の表面形状の3次元グラフである。1.5mmあった窪みは、レーザフォーミング後には0.27mmまで減少し、形状は約82%程度回復している。実験結果より、曲げが主で塑性変形している外周部分はレーザフォーミングによって形状回復が進んでい

ることを確認した。しかし中心部の変形を完全に回復することはできなかった。そのには、材料に生じた引張りによるたわみを解消する必要があると考えられる。また、今回の実験では出力350Wの方が出力300Wの場合に比べて回復率が悪くなったが、これは試料に事前に与えられた塑性変形量の影響を受けているからだと考えられる。

表2 レーザ照射条件2 (P=350W)

scanning paths	1	2	3	4	5
diameter of scanning path	φ20	φ17	φ14	φ11	φ8
power	350W				
beam diameter	φ1.98				
heating-cooling cycles	3 sets				



(a) レーザ照射前 (b) レーザ照射後

図6 レーザフォーミングによる形状回復 (P=350W)

3.2 塑性変形部の深さが回復率に及ぼす影響

塑性変形部の異なる試料に、表1と同じレーザー照射条件でレーザーフォーミングを施した結果を図7と図8に示す。

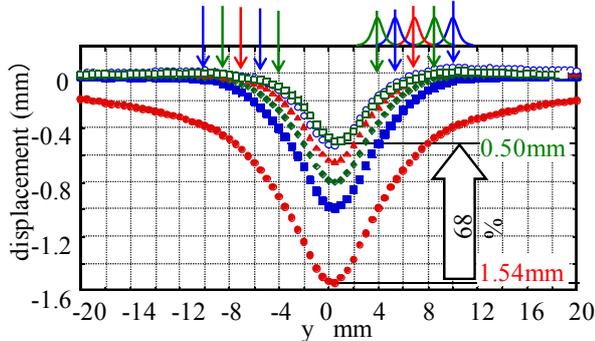


図7 塑性変形量が形状回復に及ぼす影響 (d1=1.54mm)

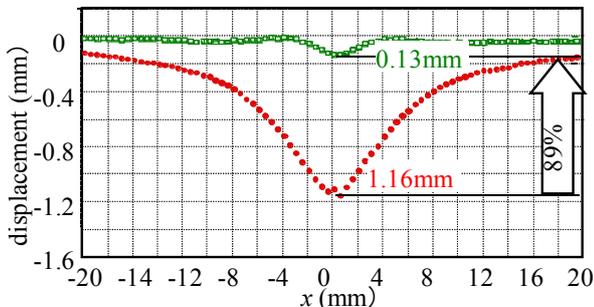


図8 塑性変形量が形状回復に及ぼす影響 (d1=1.16mm)

図7は、深さ1.54mmの深い凹みにレーザーフォーミングを施した結果、回復率が68%であったことを示している。

図8は、深さ1.16mmの浅い凹みにレーザーフォーミングを施した場合、回復率が89%になったことを示している。また、図5より深さ1.42mmの中程度の凹みの場合は回復率が85%であり、これらの結果より塑性変形量が大きくなるほど同条件のレーザーフォーミングでは回復量が小さくなるが分かった。

3.3 中心部へのレーザー照射が変形回復量に及ぼす影響

塑性変形中心部の形状回復を図るため、中心部にもレーザーを照射するとともに、出力の異なるレーザーを照射し、レーザー出力が変形回復量に及ぼす影響を調べた。実験では、まず図7の結果と比較するために表3に示すように内側の経路(φ5, φ2)に対してもレーザーフォーミングを施した。次に6の結果と比較するために表4に示すような7つの経路に対して外側から順にレーザーフォーミングを行った。

表3 レーザ照射条件3 (P=300W)

scanning paths	1	2	3	4	5	6	7
diameter of scanning path	φ20	φ17	φ14	φ11	φ8	φ5	φ2
power	300W						
beam diameter	φ1.98						
heating-cooling cycles	3 sets						

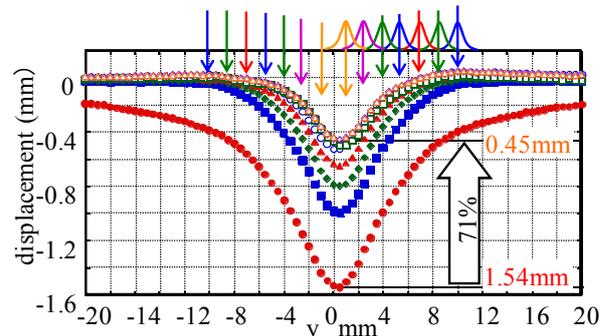


図9 中心部へのレーザー照射による形状回復 (P=300W)

表4 レーザ照射条件4 (P=350W)

scanning paths	1	2	3	4	5	6	7
diameter of scanning path	φ20	φ17	φ14	φ11	φ8	φ5	φ2
power	350W						
beam diameter	φ1.98						
heating-cooling cycles	3 sets						

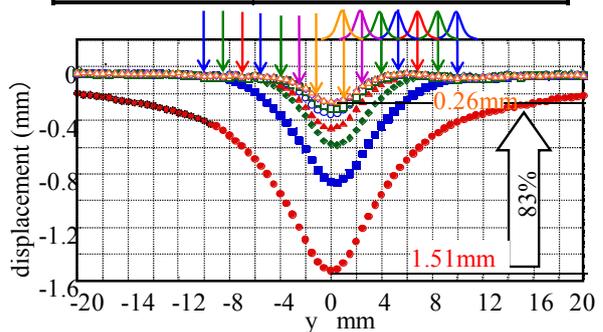


図10 中心部へのレーザー照射による形状回復 (P=350W)

最大深さが1.54mmの塑性変形部に出力300Wのレーザを中心部にまで照射した場合、図9のように最大深さは0.45mmに減少し、回復率は71%になった。図7に示す外周部だけにレーザ照射した場合に比べて回復率は3%高くなった。また、最大深さが1.51mmに出力350Wのレーザを中心部まで照射した場合、図10のように最大深さは0.26mmとなり、回復率は83%となった。図6に示す外周部だけにレーザ照射した場合に比べて僅かではあるが1%回復した。これより中心部近傍までレーザフォーミングを施せば、回復量が僅かではあるが上昇することが分かった。

3.4 スポット径を絞ったレーザによる中心部の変形回復

単純に同じレーザ照射条件で塑性変形中心部までレーザを照射しても中心部(φ5, φ2)を精度よく回復させることはできなかった。この原因のひとつとして、中心部付近においてはレーザスポット直径に比べて照射経路の直径が小さく、自己冷却が効かなくなり表面と裏面の温度差が減少するとともに広い範囲の温度が高くなるため、温度勾配メカニズムから座屈メカニズムに移ったことが考えられる。そこで表4のように経路6(φ5)と経路7(φ2)においてレーザのスポット径を1/2とし、またビーム中心でのエネルギー密度が外周部での照射条件と変わらないように出力を1/4としてレーザフォーミングを行った。実験の結果を図11に示す。

表5 レーザ照射条件5

scanning paths	1	2	3	4	5	6	7
diameter of scanning path	φ20	φ17	φ14	φ11	φ8	φ5	φ2
power	300W					87W	
beam diameter	φ1.98					φ1.00	
heating-cooling cycles	3 sets						

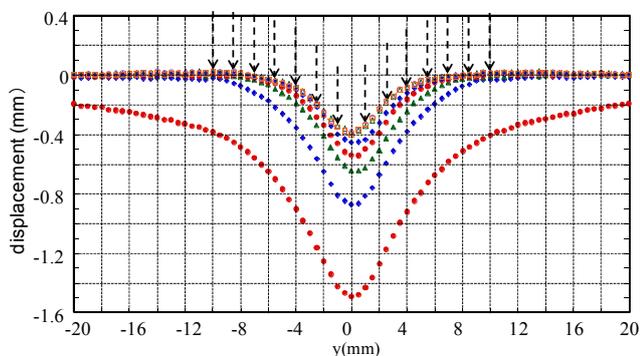


図11 スポット直径と出力の変更による効果

最大深さ1.50mmの塑性変形部がレーザフォーミング後には0.4mmまで減少し、形状は約73%回復した。この中で経路5(φ8)へのレーザ照射後の時点では、塑性変形

部の最大深さは0.45mmであり、形状は約70%回復しており、経路6(φ5)へのレーザ照射により、更に3%の回復がみられた。ただし、経路7(φ2)へのレーザ照射では、試料形状にほとんど回復は見られなかった。

3.5 塑性変形部周辺へのレーザ照射が変形回復量に及ぼす影響

本研究が提案しているレーザフォーミングにより、塑性変形部の外周付近は形状の回復が実現しているものと考えられるが、変形の中心領域の凹みは全体としての試料の伸びを解消しなければ塑性変形前に回復することは困難であると考えられる。そこで、塑性変形量の少ない範囲からレーザを照射することで、中心部を外側に引張り形状回復できるのではないかと考えた。塑性変形部の周囲にUMを発生させることができれば、塑性変形部を外側に引張る効果が生じると考え、本実験では塑性変形部の周囲のへもレーザを照射した。

塑性変形部の周囲(φ40φ37φ34φ31φ28φ25φ22)ではレーザ出力を250Wに設定し、塑性変形部(φ19φ16φ13φ10φ7)ではレーザ出力を350Wに設定し、レーザフォーミングを行った。その結果、図12に示すように、塑性変形部の周囲にもTGMによって塑性変形部の周囲が上に反ろうとしていることがわかる。ただし、中心部には0.41mm程度の凹みが残っており、中心部の完全な回復には至らなかった。

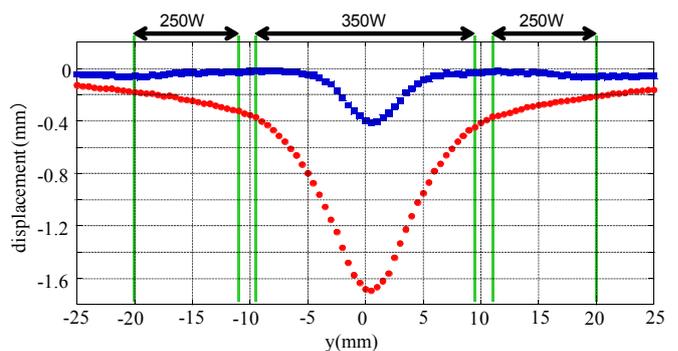


図12 変形部周囲へのレーザ照射の効果

4. 結言

本研究ではSUS304板につけられたすり鉢状の塑性変形部を修復するために、複数の同心円上にレーザを走査させてレーザフォーミングを施し、凹みを回復させる手法を考案し、その有効性を検証した。得られた成果を以下に示す。

1) 塑性変形部外周の円形状の走査経路(φ20φ17φ14φ11φ8の5経路)に、出力CW350W、スポット直径1.98mmのレーザを送り速度5mm/secで照射し、各経路に加熱

ー冷却サイクルを3セット行った。外側から内側へ順にレーザーフォーミングを行った結果、最大深さが1.50mmであった。鉢状の塑性変形部を最大深さが0.27mmになるまで減少させ82%程度形状回復することができた。

2) 最大深さが1.54mmの塑性変形部に出力(300W)のレーザーを中心まで照射した場合、塑性変形部の最大深さは0.45mmと71%しか回復しなかったが、同程度の凹み(最大深さ:1.51mm)に出力350Wのレーザーを照射した場合、最大深さは0.26mmとなり83%回復し、出力に比例して回復率が向上することを確認した。

3) 温度勾配メカニズム(TGM)により、レーザーが照射された部分は上に反るように変形してその周辺を巻き込んで中央の凹んだ部分を持ち上げると考えた。また実験より塑性変形部の外側から内側に向けて順にレーザーを照射するに伴って試料につけられた凹みが周辺から徐々に回復していくことを確認した。

4) 塑性変形中心部は外周に比べて変形しにくく、形状回復を図るためにはレーザー出力を上げる、あるいは照射回数を増やす必要があることが分かった。

5) 塑性変形部周囲へのレーザー照射することによって中心部分が若干外側へ引っ張られる効果は見られたものの、平板を完全に回復するには至らなかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益法人天田財団の平成23年度の一般研究開発助成を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) モノづくりの原点科学の世界 VOL.1, ニッポン・スチール・マンスリー 2003. 5月号 pp.11-20
- 2) Y. Namba: Laser Forming in Space, Proceedings of the International Conference on Lasers '85, Las Vegas, (1986) p. 403.
- 3) 上田隆司, 山田啓司, 及川志郎, 細川晃: レーザーフォーミング加工に関する基礎的研究, 精密工学会誌, 67, 2(2001)300
- 4) 三須直志, 佐野裕, 宮崎俊行, 吉岡俊郎, 徳永剛, 田中義弘: 薄板のレーザー曲げ加工, 精密工学会誌, 71, (2005)
- 5) 杉田淳, 吉岡俊郎, 中村正美, 宮崎俊行, 三須直志: ステンレス鋼パイプのCO₂レーザーによる収縮変形加工一段付加工および真円度修正一, 砥粒加工学会誌, (2008)
- 6) Y. Wenchuan Li and Y. Lawrence, Laser bending of tubes: mechanism, analysis, and prediction, J. Manuf.

Sci. E-T ASME. 123 (2001) 674-681.

7) Z. Hu 1, R. Kovacevic, M. Labudovic, Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming, Int. J. Mach. Tools Manu. 42 (2002) 1427-1439.

8) E. Abed, S. P. Edwardson, G. Dearden and K. G. Watkins: Geometrical-based Control Method for 3D Laser Forming, Laser Assisted Net Shape Engineering 5, Proceedings of the LANE 2007 (2007) pp. 1043-1052.

9) S. P. Edwardson, K. Edwards, C. Carey, G. Dearden and K. G. Watkins, Laser forming for ship building applications, Steel Tech 2, no. 4 (2008) 42-46.

10) 奥田孝一, 戸田吉宣, 布引雅之: CO₂レーザーによるマグネシウム合金板の曲げ加工に関する研究(第2報)ーレーザースポット径の曲げ変形挙動に及ぼす影響ー, 精密工学会誌, Vol.72, No.2, pp.214-218 (2006)

11) M. Nunobiki, K. Okuda, K. Hourai and H. Shizuka, Bending of Pure Titanium Sheet to Curved Surface Shape by Laser Forming Technique, Advances in abrasive technology XIII, Vols. 126-128 (2010), pp. 388-393.

12) M. Nunobiki, K. Okuda, T. Takagawa and H. Shizuka, Deformation behavior simulation in laser forming of titanium sheet - Influence of free edge on deformation behavior in laser forming -, Advances in abrasive technology XIV, (2011) pp. 725-730.

13) 布引雅之, 蓬萊康佑, 奥田孝一, 静弘生: CO₂レーザーフォーミングによる純チタン板の曲面形成に関する研究, 砥粒加工学会誌, 55, pp.739-543 (2011)