

# レーザーフォーミングを用いた金属板材に生じた凹状変形部の修復法

布引雅之  
機械工学専攻

## Repairing concave deformations in metal sheets using laser forming

Masayuki NUNOBIKI

Department of Mechanical Engineering

This research proposes an application of laser forming for repair of dents made on the outer panel of trains or cars. A stainless steel sheet is widely used as an outer panel of the trains. When the dent was made on the outer panel, it is necessary to detach the panel once and to beat the panel from inside with the hammer. This research indicated that the dent is able to repair by irradiating laser from the outside. It is useful to repair the dent without detaching the outer panel from body. In proposed method, laser was irradiated along the shape of the dent under the irradiation condition that the sheet bent by the temperature gradient mechanism or upsetting mechanism. In our experiments, the dent of about 1.5mm depth made on a SUS304 sheet of 1mm thickness decreased to 1/5.

**Key Words:** laser forming, repairing concave deformations, TGM, UM

### 1. はじめに

金属薄板のプレス工業は日本の大きな基幹産業である<sup>1)</sup>。金属薄板プレス工業品の販売額の7割を占める自動車産業において、ボディ用鋼板には薄くて軽くて強度の高いハイテン材が利用されており、近年、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るとともに、鋼板の強度が高くなるほどスプリングバック量も大きくなるため、プレス加工時のスプリングバックの抑制ならびにスプリングバックによって生じる形状誤差を修正する方法が望まれている<sup>2)</sup>。また、電車や自動車の車輻外板としてステンレス鋼板が用いられることも多く、車輻外板に外力が加わり凹状に塑性変形した場合、従来の修正方法では、外板を一旦取り外し、塑性変形部を裏側からハンマーで叩いて押し戻した後に、外板を再度取り付けていた。この方法できれいに形を整えるには高い技術力と多くの時間（コスト）が必要となる。ただし、再塗装を行う場合は、僅かな凹みが残ったとしてもパテで埋めて研磨と塗装を行うことによって見た目を元通りに戻せるため、技術力に関するハードルは低くなるものの、時間（コスト）が大幅に削減されるわけではない。そのため短時間で修復できる新たな修復法が望まれている<sup>3)</sup>。一方、本研究が着目したレーザーフォーミングという加工法では、適切な条件でレーザーを金属板に照射するとレーザー照射面側に板を曲げることができる。本研究では、レーザーフォーミングを用いると内側に凹状に塑性変形した外板を取り外す必要がなくなり、また、技量を必要とする人の手による板金作業に代わってレーザー加工機による自動化が可能になれば、修理等にかかる時間を大幅に低減できると考えた。レーザーフォーミングが施されたレーザー照射線上は酸化スケールが生成されて変色し、加えて、高さ数 $\mu\text{m}$ の僅かな凸部が生じるが、これらもヤスリがけ・パテ塗り・研磨・塗装によって解消されるため問題にならないと考えた。難波<sup>4)</sup>らによってレーザー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。レーザーフォーミングは、板材表面にレーザー光を照射し、温度上昇に伴って低下する降伏応力を超える熱応力を局所的に生じさせることによって塑性変形を発生させて板をレーザー照射面側に曲げる加工法である。それらの研究内容は変形メカニズムの解明<sup>5-8)</sup>・薄板の曲げ<sup>9-12)</sup>・パイプ曲げ<sup>13-16)</sup>・三次元形状の作成<sup>17-20)</sup>など多岐にわたっている。本研究室においてもCO<sub>2</sub>レーザーを用いた純チタン板やマグネシウム合金板へのレーザーフォーミングによる二次元曲げや三次元曲げを行ってきた<sup>21-30)</sup>。しかし、レーザーフォーミングの三次元形状への適用例は未だ少なく、レーザーフォーミングによる加工の新たな分野の開拓が必要であると考えた。

本研究ではレーザーフォーミングの新たな利用手法として、工業製品として広く使用されているSUS304板に生じた凹状の塑性変形部に表面側からレーザーを照射して板材の形状を修復する方法を提案する。凹状の塑性変形部における外縁部は表面に大きな引張塑性ひずみが生じており、レーザーフォーミングによって表面に生じる圧縮塑性ひずみで相殺させることで形状修復が可能であると考えた。SUS304板に付けられた深さ1.5mm程のすり鉢状の塑性変形部を対象としてどのようにレーザーを照射すると形状を効果的に修復できるかを検討する。加えて、形状が非対称である場合を想定し、深さ1.5mm程のトラック状に凹んだ塑性変形部にレーザーを照射して形状回復を図り、長軸方向と短軸方向の回復量に生じる異方性について検討し、楕円状の凹面に対する回復量の異方性を解消するためのレーザー照射条件を実験的に求める。本手法は金属板内に大きな温度勾配を生じさせて変形させるものであり、ステンレス鋼板だけでなく、鉄鋼板や、チタン板、マグネシウム合金板においても適用できることを確認している。しかし、熱伝導率が非常に高いアルミ板などにおいては板内部に大きな温度勾配を生成できないため、適用が難しいと考えられる。

## 2. 外力によるすり鉢状の塑性変形部の作成と変形部に生じる塑性ひずみ

本実験では形状回復する対象とするすり鉢状の塑性変形部を、プレス機を用いて、ステンレス製の圧延板に作成する。図1に示すように、100mm×100mm×1mmのSUS304板の下に直径22mmの穴が開いたSK材製ブロックを敷き万力で拘束する。半径10mmの鋼球をプレス機に設置して、約1kNの押し付け加重で30秒間押し付ける。鋼球を押し付けられることによって生じる曲げと引張りをを受けて試験片は塑性変形し、SUS304板の中央に直径約20mm、深さ1.1~1.6mmのすり鉢状の塑性変形部が形成される。作成された塑性変形部の形状を図2に示す。試料片は圧延材であり圧延方向は図1に示すx軸方向である。また、変形部の形状を測定する際に、変形部の影響を受けていない部分を変位の基準にするため、試料片の対角線に沿って測定した。図2の変位ゼロは対角線の両端を基準にした値を示している。図のように変形部の外縁は上に凸となるように曲がっており、逆に中央は上に凹になるように曲がっている。本研究では凸状に変形している部分を外縁部、凹状に変形している部分を内心部、外縁部と中部の間の曲げが小さい領域を中間部と呼ぶ。図3に示すように外縁部と内心部は曲げと引張によって変形し、中間部は引張によって変形したと考えられる。外縁部が曲げによってのみ変形した場合、試料の表面には引張塑性ひずみが生じ、裏面には圧縮塑性ひずみが生じる。ただし、引張の影響が大きくなると試料の表面には大きな引張塑性ひずみが生じ、裏面には小さな引張塑性ひずみが生じることになると考えられる。

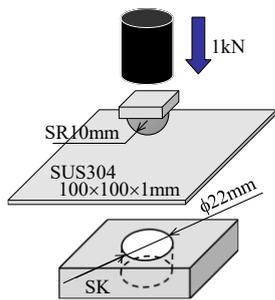


図1 塑性変形部作成方法

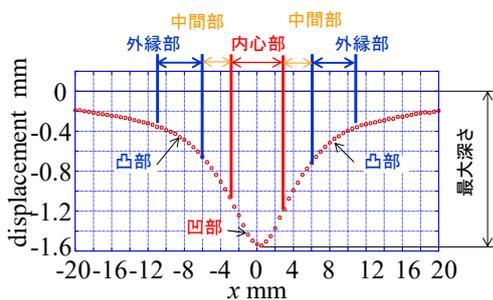
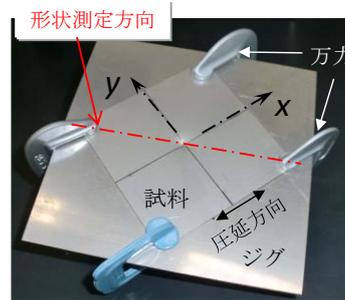


図2 作成された塑性変形部形状

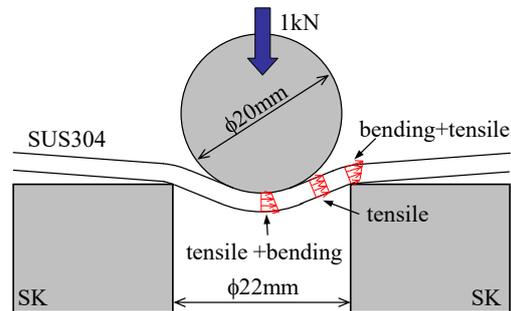


図3 鋼球の押しつけによって生じる塑性ひずみ

## 3 レーザフォーミングによる板材曲げ加工の原理

レーザフォーミングを用いた曲げ加工の原理として、現在考えられている代表的な変形メカニズムは、図4に示すように(a)温度勾配メカニズム(TGM: Temperature Gradient Mechanism)と(b)座屈メカニズム(BM: Buckling Mechanism)と(c)据込みメカニズムUM (Upsetting Mechanism)である<sup>31)</sup>。温度勾配メカニズムが働く場合、試料はレーザ照射側に曲がり、座屈メカニズムが働く場合、曲がる方向を制御できないもののレーザ照射側・照射裏側どちらに曲がり得る、据込みメカニズムが働く場合、試料はほとんど曲がらずに水平面内で縮んで板厚が増加する。以下にその加工原理を示す。

### 1) 温度勾配メカニズム(TGM)

レーザ照射された試料表面は急激に温度が上昇する。その際、レーザのパワー密度が高い、あるいは、試料の熱伝導率が低い場合、試料裏面は試料表面より遅れて温度が上昇するため、板厚方向に大きな温度勾配が生じる。急激に温度上昇した試料表面は大きく熱膨張する一方、温度の低い裏面は熱膨張が少なく、一時的に試料は裏面側に曲がるように変形する。その際、大きく熱膨張した表面は変形の小さい裏面によって変形を拘束されて圧縮応力を受ける。逆に、裏面は大きく熱膨張した表面から引張応力を受ける。圧縮応力が降伏応力を超えた場合に圧縮塑性ひずみが生じ、引張応力が降伏応力を超えた場合に引張塑性ひずみが生じる。ただし、金属の降伏応力は温度が上がるほど低くなるため、高温である試料表面は試料裏面より降伏し易い。レーザ照射後に自己冷却によりレーザ照射部の温度が低下すると、弾性変形が元に戻り、残った塑性ひずみの分だけ、試料は照射面側に曲がるように変形する。

### 2) 座屈メカニズム(BM)

レーザーが照射された試料の板厚が加熱領域に比べて小さい場合、板厚方向の温度勾配がほとんどなくなり、表面も裏面も同じように熱膨張する。一方、レーザー照射部は低温である周囲から拘束されるため表面も裏面も大きな圧縮応力を受ける。その際、加熱部分は降伏する前に座屈して面外に張り出す。レーザー照射後は自己冷却により温度が低下し、座屈の際に生じた塑性ひずみによって板材に変形が残る。ただし、座屈して張り出す方向が板の照射側か裏面側かは多くの因子が作用するため単純には定まらない。

3) 据込みメカニズム(UM)

据込みメカニズムは座屈メカニズムと似ているが、加熱領域に比べて板厚が座屈メカニズムより大きく、温度勾配メカニズムより小さい場合に生じる。圧縮応力を受ける部分の断面二次モーメントが大きいいため板材は座屈せず、圧縮されている平面内で縮むと共に板厚が増加する。据込みメカニズムはパイプの曲げに利用され、パイプの半周にのみレーザーを照射して照射部分を軸方向に圧縮することでパイプをレーザー照射面側に曲げることができる。

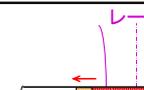
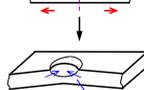
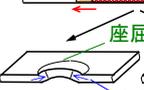
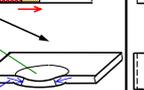
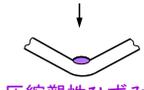
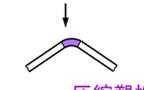
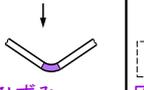
	(a) 温度勾配メカニズム	(b) 座屈メカニズム	(c) Upsettingメカニズム
	温度勾配: 大 ビーム径: 小 板厚: 小	温度勾配: 小 ビーム径: 大 板厚: 大	温度勾配: 小 ビーム径: 中 板厚: 中
加熱による熱膨張			
周辺部から拘束を受け塑性変形			
冷却に伴う塑性ひずみの顕在化			
	圧縮塑性ひずみ	圧縮塑性ひずみ	圧縮塑性ひずみ

図4 代表的なレーザーフォーミングの変形メカニズム

しかし、実際のレーザーフォーミングでは、上記のメカニズムが混ざった形で変形していると考えられる。先行研究<sup>29)</sup>におけるシミュレーションにおいて、レーザーフォーミングによって2次元曲げを行う場合、温度勾配メカニズム(TMGM)と据込みメカニズム(UM)が混ざった形で板が変形することが分かった。レーザーが高速で同一線を往復する場合は、レーザー照射部は線熱源のように振る舞い、板厚方向の温度差によって変形する温度勾配メカニズムが働くが、レーザー走査速度が遅い場合、レーザーは点熱源として振る舞うため、温度勾配メカニズムと据込みメカニズムが混ざった形で変形していた。レーザーが低速で走査されている場合、レーザー照射部上面と下面に生じる応力の模式図を図5に示す。図では、奥から手前に向かってレーザーが移動しており、奥側はすでにレーザーが照射されており、手前側はまだレーザーが照射されていない状況である。このとき、照射部上面は、レーザー照射により加熱されて膨張しており、それに伴って低温の左右方向、下部、未照射部からの3つの圧縮応力を受ける。一方、照射部下面も熱伝導によって加熱されるが上面に比べると温度は低く、熱膨張も小さい。その結果、照射部下面は、より膨張している上部からは引張応力を受けるが、低温の未照射部および左右方向からは圧縮応力を受ける。このように、走査速度が低くてレーザー照射部が点熱源とみなせる場合、上面に大きな圧縮応力、下面に小さな圧縮応力が作用して上面が大きく圧縮変形するため板は上向きに曲がることになる。

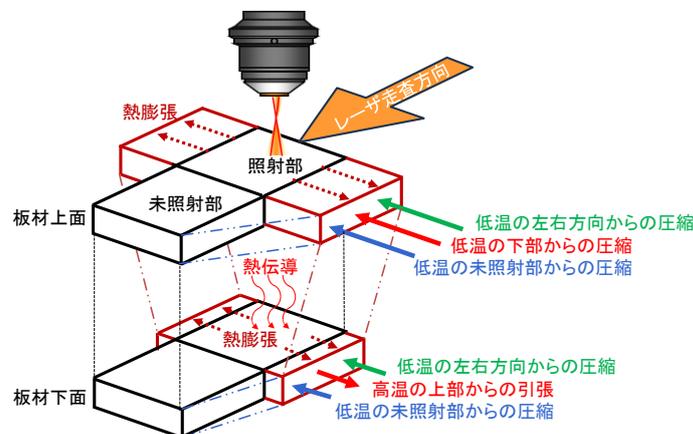


図5 レーザフォーミング時に板上面と下面に生じる応力

図 6 に示すように、塑性変形部の外縁部が曲げと引張を同時に受けた場合、試料の表面には大きな引張塑性ひずみが生じ、裏面には小さな引張塑性ひずみが生じる。図のように、レーザーフォーミングによって表面に大きな圧縮塑性ひずみが生じ、裏面に小さな圧縮塑性ひずみが生じると、引張塑性ひずみと相殺し、変形回復が期待できる。ただし、引張の影響が小さく曲げのみによって変形した場合、試料の表面には引張塑性ひずみが生じ、裏面には圧縮塑性ひずみが生じるため、走査速度の遅いレーザーフォーミングでは十分に回復できないため、TGM が働く条件でレーザー照射する必要がある。

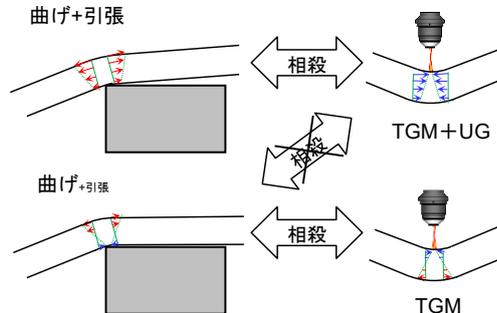


図 6 外力による塑性変形部に生じる塑性ひずみとレーザーフォーミングによって生じる塑性ひずみ

#### 4. 塑性変形部回復に用いるレーザー照射条件の設定

##### 4.1 レーザ 1 回照射によるレーザー出力が曲げに及ぼす影響

本研究の目的は塑性変形部の回復であり、レーザー照射によって試料表面が溶融しないように照射条件を調整する必要がある。本研究で用いるレーザー加工機は三菱電機社製 CO<sub>2</sub> レーザ加工機(MELLASER 806T-3016S 定格出力 1600W)であり、波長は 10.6μm、パワー密度分布は TEM<sub>00</sub> モード、連続波(CW)の CO<sub>2</sub> レーザを用いた。図 7 に示すように 20mm×90mm×1mm の SUS304 板に CO<sub>2</sub> レーザを照射してレーザー照射条件を設定する予備実験を行った。試料片に照射されるレーザーは直径 18mm のレーザーを焦点距離 127mm のレンズで集光し、被加工材表面でのスポット直径が 2.0mm になるようにデフォーカス量を調整している。レーザーを照射する場所は、試料片の自由端から 70mm 離れた直線上の 30mm の区間とした。レーザー出力を 150W、180W、200W、250W、300W、400W と変えて、走査速度 5mm/s でレーザーを 1 度だけ走査させた。また、レーザー照射中は乾燥空気を 49kPa の圧力でレーザー照射部に吹き付けた。アシストガスは、本来レーザー切断加工時に切断した箇所の溶融した金属が試料本体に再付着しないように吹き飛ばすためのものであるが、本実験では冷却処理に流用している。レーザー照射中の試料温度は、レーザー走査線中央の裏面に取り付けられた K 型熱電対を用いて測定した。また、試料の曲げ角度は、照射部から 70mm 離れた位置の変位を変位センサによって測定して計算した。使用した変位センサは、キーエンス社製 CCD レーザ変位センサ(センサヘッド:LK-080、アンプユニット:LK-2100)であり、測定範囲は±15mm、分解能 3μm である。図 8 に示すように、出力が 200W 以上になると SUS304 板表面に茶色い酸化スケールが視認できたものの、出力が 400W 以下であれば SUS304 板表面を溶融させることなく曲げられることを確認した。

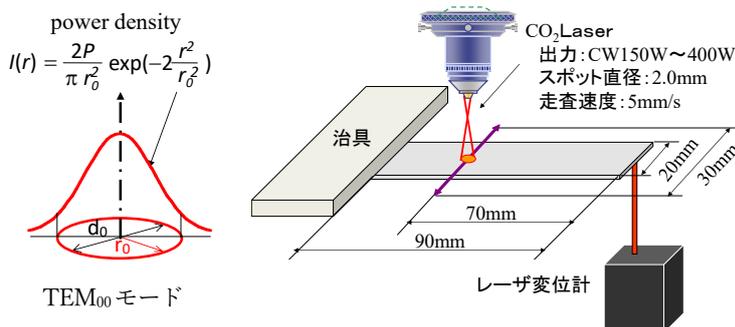


図 7 レーザーフォーミングによる SUS304 板の曲げ実験

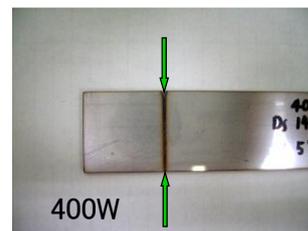


図 8 出力 400W において表面に生じたヤケ

##### 4.2 レーザ複数回照射におけるレーザー照射-冷却条件の設定

予備実験においてレーザーを同一経路に複数回連続的に照射すれば試料片はより大きく曲がるものの、レーザー照射を繰り返すほどレーザー照射毎に発生する曲げ角は減少することを確認している。加えて、レーザー照射を繰り返すと試料片に熱が蓄積して試料表面が溶融するため、適切に冷却する必要がある。そこで、いくつかのレーザー照射-冷却プロセスを考えて、効率よく曲げられるレーザー照射-冷却条件について検討した。レーザーを 1 回走査させる度にアシストガスによる冷却を 2 往復半 (5 回) 行って試料温度を室温まで冷却するパターン A と、レーザーを 2 往復半 (5 回) 走査させる度にアシストガスによる冷却

を2往復半(5回)行って試料温度を室温まで冷却するパターンBの2つのレーザ照射-冷却プロセスを用いて、それぞれレーザフォーミングを行った。どちらもスポット直径が2.0mm、出力180W、走査速度5mm/sとしてレーザを20回走査(10往復)させている。レーザ照射中は乾燥空気を圧力49kPaでレーザ照射部に吹き付けている。冷却時はレーザを照射せずに乾燥空気を49kPaの圧力で吹き付けながら往復させている。図9に出力180Wのビームを用いた場合のレーザ照射部裏面の温度測定結果を示している。どちらもアシストガスによる冷却後に試料温度は室温まで下がっていることを確認した。どちらの場合でも15回目の照射後の曲げ角は5°程度であったがそれに要する時間を比べるとパターンBが240秒であり、パターンAの720秒の約1/3であったため、以降の実験ではこの2往復半(5回)のレーザ照射-2往復半(5回)のアシストガス冷却パターンを用いることにした。

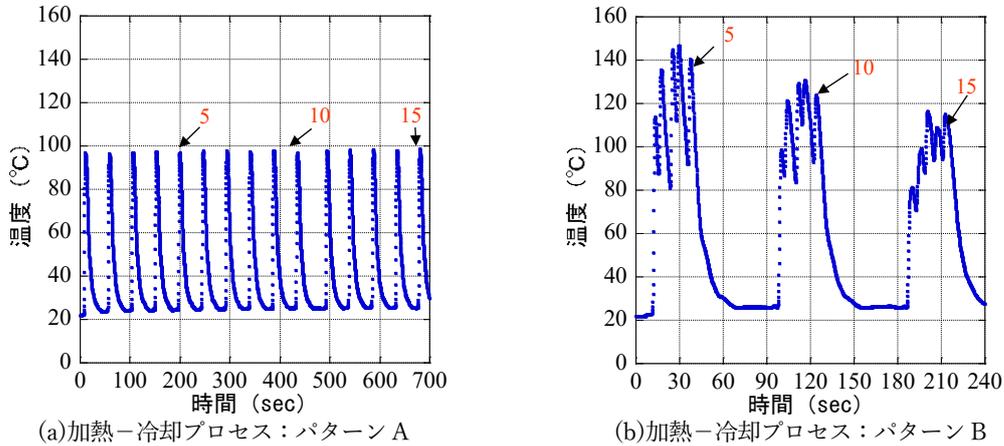


図9 レーザ加熱-冷却パターンと照射時の中央裏面の温度変化

#### 4.3 レーザ複数回照射におけるレーザ照射-冷却セット数が曲げ角に及ぼす影響

次に、レーザ照射-冷却セットの繰り返し数が曲げ角度に及ぼす影響を検討した。図9(b)に示す加熱-冷却プロセスを用い、SUS304板に2往復半(5回)照射した後にアシストガスを2往復半(5回)吹き付ける加熱-冷却プロセスを1セットとし、25セット繰り返した場合の曲げ角度の変化を測定した。レーザ照射条件は出力220W、スポット直径2.0mm、走査速度5mm/s、アシストガスは乾燥空気、ガス圧49kPaとした。照射セット数と曲げ角度の関係を図10示す。曲げ角は1セット目で2.04°、2セット目で3.89°(+1.85°)、3セット目で5.52°(+1.63°)、4セット目で6.86°(+1.34°)で、5セット目で8.02°(+1.16°)、また、10セット目で11.5°、25セット目で15.9°となった。このように同一箇所複数回レーザ照射-冷却プロセスを繰り返せば曲げ角は大きくなるものの1セット当たりの曲げ角は徐々に減少したため、塑性変形回復実験では同一経路へのレーザ照射は3セットとした。

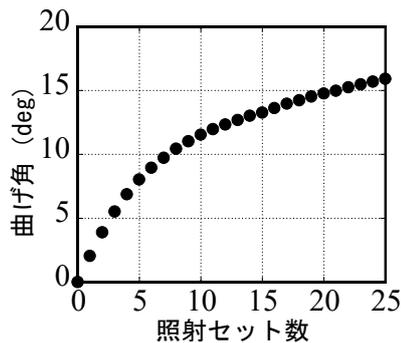


図10 照射-冷却セット数と曲げ角の関係

### 5.レーザフォーミングを用いたすり鉢状塑性変形部の回復

#### 5.1 すり鉢状変形部の回復に及ぼすレーザ照射経路形状の影響(円形経路と矩形経路)

照射経路の違いが回復量に及ぼす影響を確認する。SUS304試料中央に深さ1.1mm程のすり鉢状の塑性変形部を形成し、それに対して図11に示す(a)矩形経路と(b)円形経路の2種類の走査経路を設定して変形部の回復を行った。円形経路においてはφ20、φ17、φ14、φ11、φ8の5つの経路にそれぞれレーザフォーミングを施した。矩形経路においては□20の経路とそれに45°傾いた□20の経路、同様に2つの□10の経路、□5の経路の5つの経路にそれぞれレーザフォーミングを施した。レーザフォーミング条件は前節の結果より、経路に沿って5周レーザを照射した後にアシストガスのみを同じ経路で5周吹き付けて冷却する加熱-冷却プロセスを1セットとして、この加熱-冷却プロセスを各経路に対して3セット行った。

レーザー照射時にはスポット直径 2.0mm、出力 300W の連続波レーザーを、アシストガスとして乾燥空気をガス圧 25.4kPa で吹き付けながら、走査速度 5mm/s で走査した。冷却時にはレーザーを照射せず乾燥空気をガス圧 25.4kPa で吹きつけながら 5 周走査させた深さ 1.1 mm 程のすり鉢状に凹んだ塑性変形部に、円形経路と矩形経路を設定してレーザーフォーミングを施した場合の、それぞれ回復前と回復後の表面形状を測定し回復の様子を比較した。試料の変位は CCD レーザ変位計を用いて 図 11(c) に示す X 軸方向に沿って測定した。

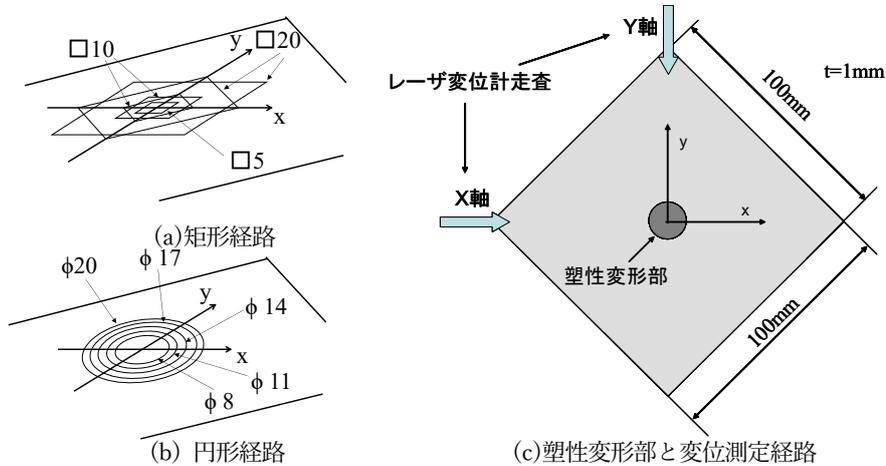


図 11 すり鉢状塑性変形部と円形経路と矩形経路

矩形照射ならびに円形照射における回復前と回復後の X 軸上の表面形状をそれぞれ図 12(a) と図 12 (b) に示す。図中の矢印は試料表面の X 軸と照射経路の x 軸との対応関係を示している。矩形照射の場合、塑性変形部の最大深さは 1.12mm から 0.20mm へと 83%回復したものの板全体に大きな反りが発生した。円形照射の場合、塑性変形部の最大深さは 1.16mm から 0.13mm へと 89%回復し、板材全体の反りもほとんど生じなかった。矩形照射において反りが生じたのは試料の母材の正常部分にまでレーザーを照射し変形させたためと考えられ、変形回復を行う場合は変形部外縁形状に沿ってレーザーを照射する必要があることが確認できた。

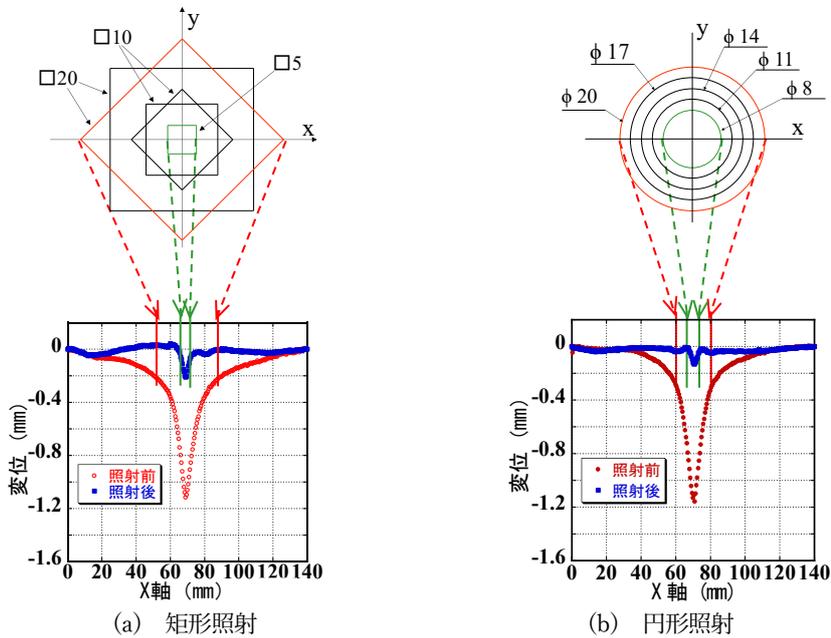


図 12 レーザ照射経路と変形回復量

## 5.2 円形照射を用いたレーザーフォーミングによる塑性変形部の回復過程

すり鉢状に凹んだ塑性変形部を修復するために、レーザー走査経路を複数の同心円に設定し、円形照射を施すことで形状回復を行った。レーザー走査経路を図 13 に示す 5 つの同心円である経路①から経路⑤に設定し、外縁側の経路①から中心側の経路⑤へと順番にレーザーフォーミングを施した。各経路においてレーザーを 5 周照射した後にアシストガスのみを同じ経路で 5 周吹き付けて冷却するプロセスを 1 セットとして、この加熱—冷却処理を 1 つの経路にそれぞれ 3 セット行った。レーザー照射時は、スポット直径 2.0mm の CW レーザを、ガス圧 0.25kPa で乾燥空気を吹きつけながら、レーザー走査速度 5mm/s、

レーザ出力 300W で照射し、それに対する試料表面の変化を観察した。また、試料の表面形状は CCD レーザ変位計を用いて図 11(c)に示す X 軸に沿って測定した。

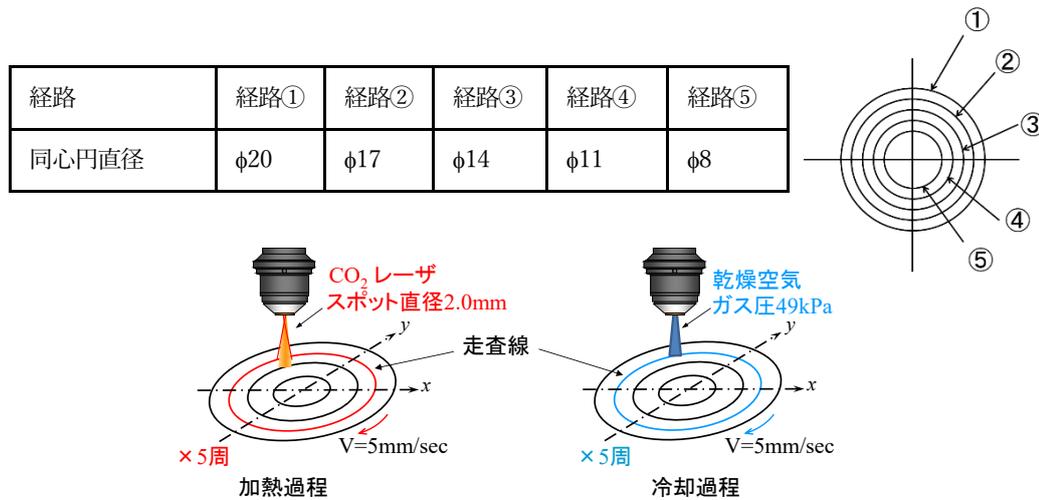


図 13 レーザ照射-冷却プロセス (1 セット)

深さ 1.42mm のすり鉢状の塑性変形部に、このレーザ照射条件でレーザフォーミングを施した際の、塑性変形部の回復過程を図 14 に示している。図中の矢印はレーザ照射位置を示している。また、●印はレーザ回復処理を行う前の表面形状である。濃い青色の破線の矢印は経路① (φ20) にレーザを照射した位置を示している。経路①へのレーザフォーミングによって板材は図中の■印で示す形状に回復した。この表面に深緑色の矢印で示す経路②にレーザフォーミングを施すことで◆印で示す形状に回復した。このように変形部の外側から内側に向けて順にレーザを照射するのに伴って試料につけられた凹みが周辺から徐々に回復することを確認できた。図 14 では最終的に同心円状にレーザフォーミングを施した部分がほぼ平坦になるように回復し、1.42mm あった最大深さが 0.25mm となり 82%回復したことが確認できた。

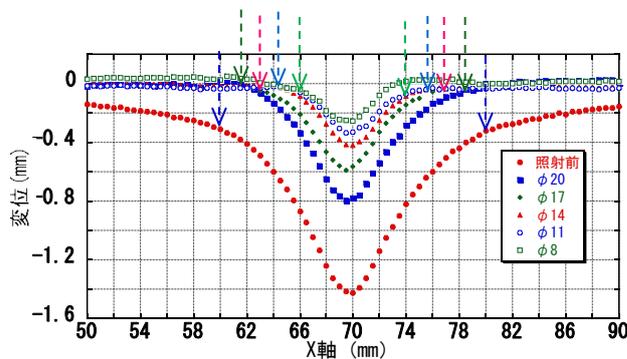


図 14 塑性変形部の回復過程(深さ 1.42mm、出力 300W)

### 5.3 内心部へのレーザ照射が回復量に与える影響

前節のように、すり鉢状の塑性変形部の外縁部と中間部にレーザフォーミングを施した場合、すり鉢状の塑性変形部の外周部分を平坦に形状回復できたものの、内心部の凹みは十分に回復されず、丸く浅い窪みが残った。そこで、塑性変形内心部の形状回復を図るために内心部にもレーザフォーミングを施す実験を行った。実験では、深さが 1.54mm 程度の円錐状の塑性変形部を回復させるために、前節と同じように直径がφ20mm、φ17mm、φ14mm、φ11mm、φ8mmとなる5つの同心円の経路へのレーザフォーミングに加えて、図2に示した内心部に対してもφ5mm、φ2mmの2つの同心円の経路にレーザフォーミングを施した。レーザ照射条件は5.2節と同様である。深さ 1.54mm の塑性変形部に対して内心部までレーザフォーミングを施した場合の回復過程を図 15 に示す。図中の矢印はレーザ照射位置を示している。回復前の塑性変形部深さが図 14 の場合より少し深いことが影響し、図 15 に示す回復後の塑性変形部深さは 0.45 であり、回復量は 71%であった。レーザフォーミング前の塑性変形部の深さは -1.54mm であり、経路①から順にレーザフォーミングを施すごとに深さは -0.99mm(φ20)、-0.80mm(φ17)、-0.65mm(φ14)、-0.53mm(φ11)、-0.50mm(φ8)、-0.45mm(φ5)、-0.45mm(φ2)となり、内心部(φ5、φ2)へのレーザフォーミングはほとんど形状回復に寄与しないことが分かった。また、図2に示す外縁部のさらに外側にもレーザフォーミングを施す実験を行ったが、最大深さは小さくなるものの、外縁部の外側が大きく盛り上がる結果となり、形状回復に対して有効ではないことが分かった。

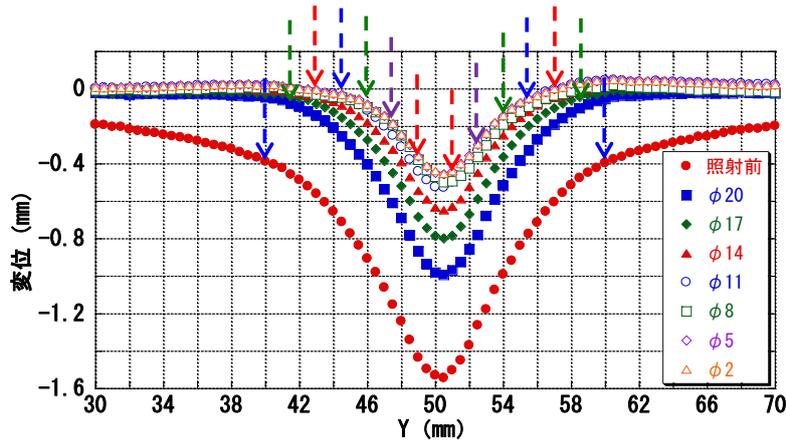


図15 内芯部までレーザーフォーミングを施した場合の回復過程(レーザー出力 300W)

#### 5.4 レーザ出力がすり鉢状塑性変形部の回復に与える影響

次に、レーザー出力が曲げ挙動に及ぼす影響について検討した。5.3節と同程度の深さ(1.51mm)のすり鉢状塑性変形部に出力を350Wに高めてレーザーフォーミングを施した場合、図16に示すように回復した。図中の矢印はレーザー照射位置を示している。回復後の塑性変形部の深さは0.26mmとなり、出力が300Wの場合より大きく83%回復した。これより塑性変形部深さに合わせてレーザー出力をコントロールすることが有効であると考えられる。ただし、出力が300Wの場合と同様に内芯部(φ5、φ2)へのレーザーフォーミングはほとんど形状回復に寄与しなかった。

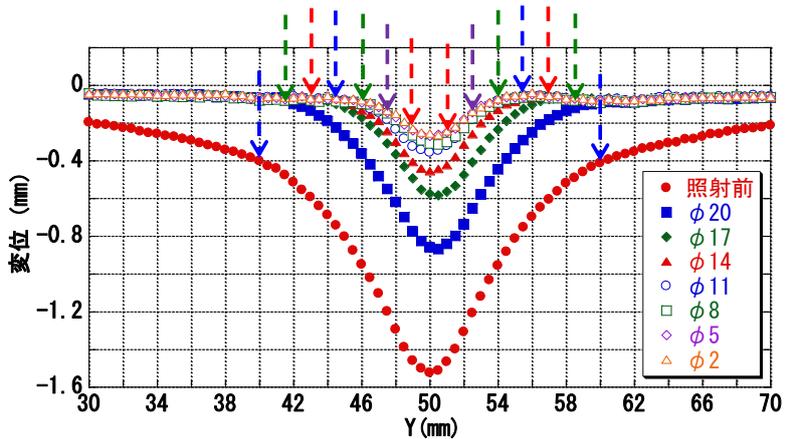


図16 内芯部までレーザーフォーミングを施した場合の回復過程(レーザー出力 350W)

### 6. トラック状塑性変形部の回復

#### 6.1 トラック状塑性変形部の作成

軸対象な形状であるすり鉢状の凹みに対しては、レーザー照射経路を変形部外縁形状と同心円となるように設定した。同一照射経路上ではどの場所でも同じ曲率の塑性変形が生じているため、変形を回復するためには変形部外縁形状を照射経路としてレーザーを照射することが有効であった。しかし、同一照射経路内でも場所によって塑性変形量が異なる場合は、注意が必要になる。例えば、回復対象として図17と図18に示すトラック状の塑性変形部を考える。図17に示すように、中央にトラック状の穴の開いた鋼製ブロックの上に置いた厚さ100mm×100mm×1mmのステンレス板の試料片の中央に、プレス機を用いて、両端を半球状に加工した直径6mm、長さ10mmの鋼材を5kNの押し付け加重で30秒間押し付けた。このようにして、図18に示すような長軸方向幅40mm・短軸方向幅20mm・深さ約1.6mmのトラック状の凹みを作成した。図18(a)に示すように、x軸に沿ってlineAを、y軸に沿ってlineCを、またy軸から2mm離れたlineBとlineDを設定し、それぞれのlineで凹みの形状を測定した。測定結果を図18(b)に示す。y軸と平行なlineB、lineC、lineDに沿って測定した形状はほとんど同じ形状であり、内芯部はおよそ1.63mm凹んでいることが確認できた。また、lineCに沿った凹み形状をlineAに沿った凹み形状と比較すると、y軸方向にある外縁部の曲率はx軸方向にある外縁部の曲率に比べて小さくなっていた。このことより、同一照射経路においてもy軸方向にある外縁部では塑性変形量が大きく、x軸方向にある外縁部の塑性変形量が小さいため、同一条件でレーザーフォーミングを施すと回復量に差異が生じると考えられる。

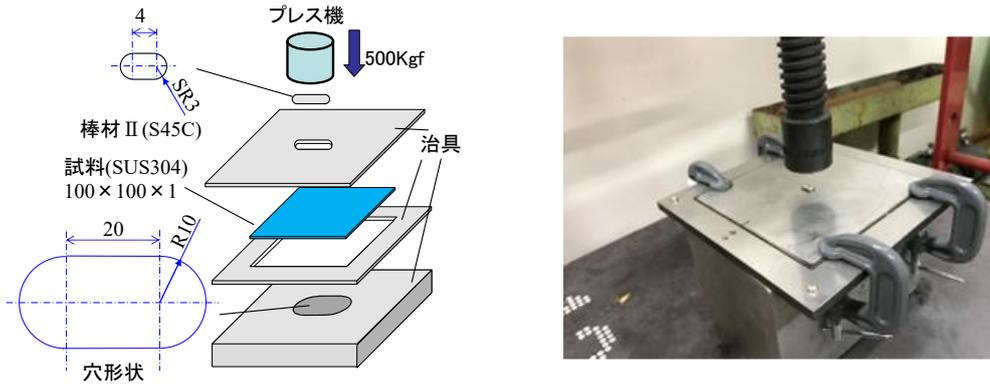


図 17 トラック状塑性変形部の作成方法

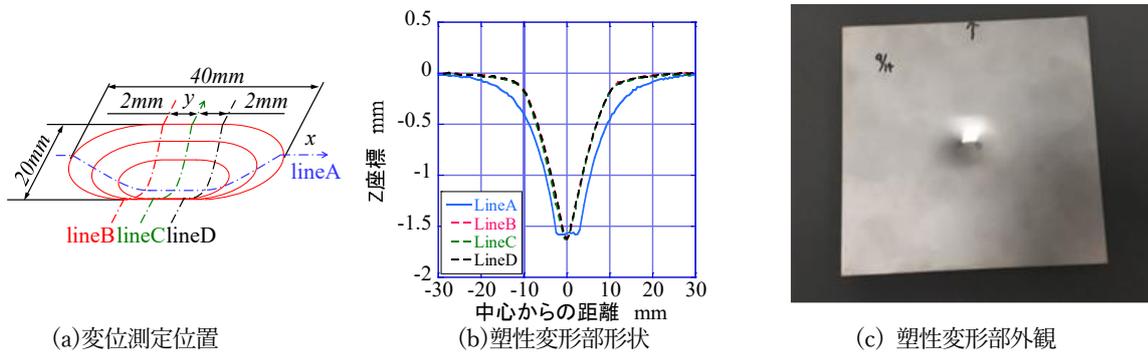


図 18 試験表面に作成した塑性変形部

## 6.2 レーザ出力がトラック状塑性変形部の変形回復に及ぼす影響

実験では、トラック状に凹んだ塑性変形部に対して、図 19(a)のように凹み形状と相似した複数の走査経路に沿ってレーザフォーミングを施した。実験には CO<sub>2</sub> レーザを用いた。試料片に照射されるレーザは直径 18mm の TEM<sub>00</sub> モードの連続波 (CW) レーザを焦点距離 127mm のレンズで集光し、被加工材表面でのスポット直径が 2.0mm になるようにデフォーカス量を調整している。図 19(a)に示す 5 つの走査経路に対して外側から順にレーザフォーミングを施した。図 19(c)に示すように、走査経路毎に、Ar ガスを 49kPa の圧力で吹きつけながらレーザを走査速度 5mm/s で 5 周走査して加熱した後、Ar ガスのみを 49kPa の圧力で吹きつけながら走査速度 5mm/min で 5 周走査して室温まで冷却した。実験ではレーザ出力を 200W、250W、300W、330W、350W に設定し、レーザ出力が変形回復に及ぼす影響を検討した。

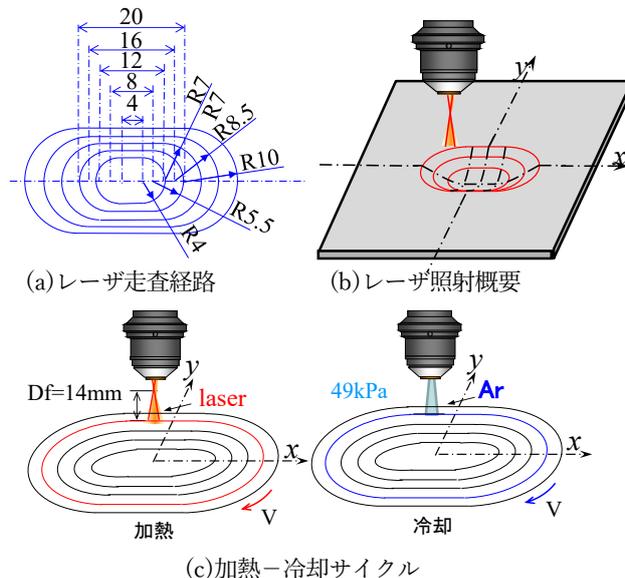


図 19 レーザフォーミングプロセス

レーザフォーミング前とレーザフォーミング後の試料表面の形状を測定し、line B、line C、line D 最下点での Z 座標を用いて回復率を計算した。回復前の凹みの深さを  $h$ 、回復後の凹みの深さを  $h'$  とし、回復率を  $\{(h-h')/h\} \times 100$  として算出した。各レーザ照射条件でレーザ照射した後の塑性変形部の形状を図 20 に示す。図 20 (a)は出力が 200W の場合であり、深さ 1.60mm の凹みが line B において 0.41mm 回復し、line C では 0.45mm 回復し、line D では 0.43mm 回復しており、回復率はそれぞれ 26%、28%、27%となった。図 20 (b)は出力が 250W の場合であり、深さ 1.60mm の凹みが line B では 0.71mm 回復し、line C では 0.74mm 回復し、line D では 0.73mm 回復しており回復度はそれぞれ 44%、46%、45%となった。図 20 (c)は出力が 300W の場合であり、深さ 1.59mm の凹みが line B では 1.01mm 回復し、line C では 1.06mm 回復し、line D では 1.01mm 回復しており、回復率はそれぞれ 64%、67%、64%となった。図 20 (d)は出力が 330W の場合であり、深さ 1.62mm の凹みが line B では 1.11mm 回復し、line C では 1.16mm 回復し、line D では 1.10mm 回復しており、回復率はそれぞれ、69%、71%、68%となった。図 20 (e)は出力が 350W の場合であり、深さ 1.56mm の凹みが line B では 1.24mm 回復し、line C では 1.28mm 回復し、line D では 1.21mm 回復しており、回復率はそれぞれ、80%、82%、78%となった。ただし、図 21 に示すように、出力が 300W では試料表面は溶融しなかったが、330W と 350W では一部が溶融した。出力が 300W 以下では、図 20 (f)のように回復率は出力に比例して大きくなるのがわかった。ただし、レーザ出力だけの調整では 65%程度回復が限界であった。

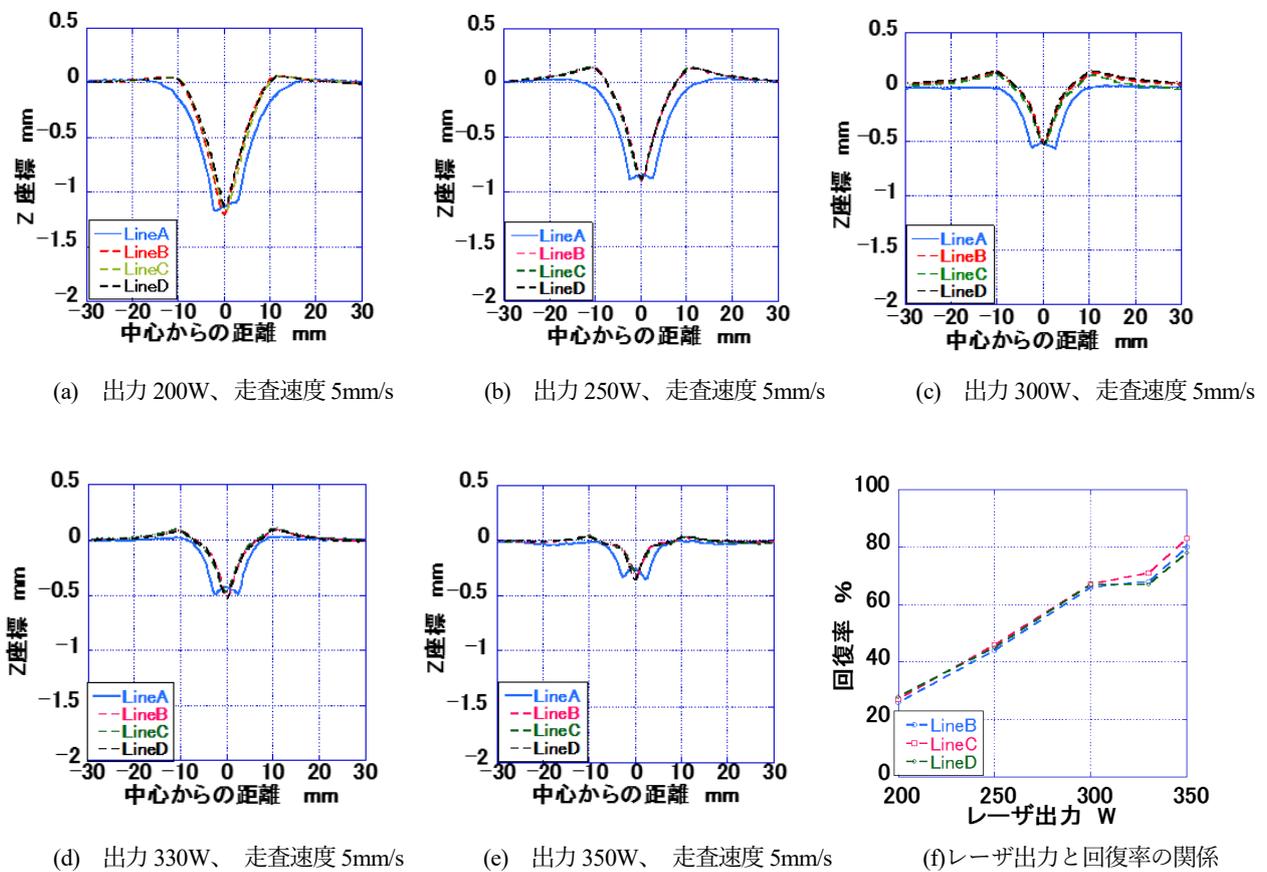


図 20 レーザ出力が変形回復に及ぼす影響



(a)出力 300W、走査速度 5mm/s



(b) 350W、走査速度 5mm/s

図 21 レーザフォーミング後の試料表面

### 6.3 レーザ走査速度がトラック状塑性変形部の変形回復に及ぼす影響

レーザ走査速度が変形回復に及ぼす影響を検討した。本実験ではレーザ出力を 300W に設定して、レーザ走査速度を 7.5mm/s、9.2mm/s、9.7mm/s、10mm/s として、5mm/s の場合の回復状況と比較した。各条件での回復状況を図 22 に示す。図 22(a)は走査速度が 7.5mm/s の場合であり、深さ 1.60mm の凹みが line B では 0.65mm 回復し、line C では 0.72mm 回復し、line D では 0.69mm 回復しており、回復率はそれぞれ、41%、45%、43%であった。図 22 (b)は走査速度が 9.2mm/s の場合であり、深さ 1.59mm の凹みが line B では 0.53mm 回復し、line C では 0.53mm 回復し、line D では 0.5mm 回復しており、回復率はそれぞれ、33%、33%、32%であった。図 22 (c)は走査速度が 9.7mm/s の場合であり、深さ 1.66mm の凹みが line B では 0.45mm 回復し、line C では 0.45mm 回復し、line D では 0.43mm 回復しており、回復率はそれぞれ、27%、27%、26%であった。図 22 (d)は走査速度が 10mm/s の場合であり、深さ 1.63mm の凹みが line B では 0.39mm 回復し、line C では 0.4mm 回復し、line D では 0.37mm 回復しており、回復率はそれぞれ、24%、25%、23%であった。これらの実験結果をまとめたものが図 22 (e)であり、レーザ走査速度を遅くするほど回復率は大きくなった。また、中心から y 軸方向に 10mm 離れた地点の Z 座標を測定した。LineB・LineC・LineD において、x 軸から 10mm 離れた位置の Z 座標を図 22(f)に示す。図のように、レーザ走査速度が 5mm/s、7.5mm/s、9.2mm/s、9.7mm/s、10.0mm/s と速くなるほど、lineC 上の y 軸方向外縁部の盛り上がりは、0.13、0.09、0.05、0.001、-0.02 と小さくなり、回復率を大きくしようとするほど y 軸方向外縁部が盛り上がってしまうことが分かった。

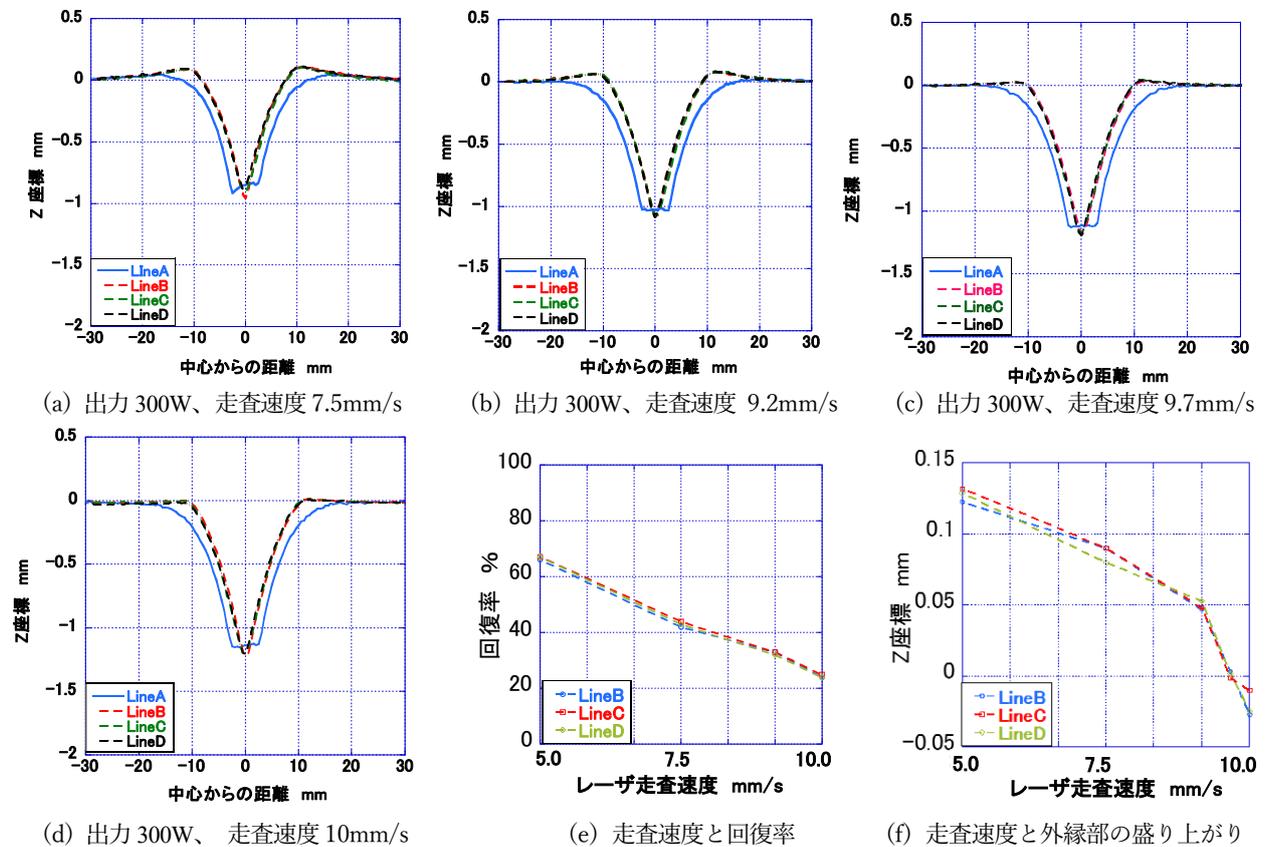


図 22 レーザフォーミング後の試料表面

### 6.4 直線部と曲線部で異なる照射条件を適用する回復法

全ての走査経路に対して同一の条件(例えば出力 300W、走査速度 5mm/s)でレーザを照射した場合、図 23 に示すように、凹みの深さは 67%回復するものの、y 軸方向の外縁部において、外縁部の凸形状は平坦にならず、しかも板材表面が過剰に盛り上がってしまうことが分かった。このように、全経路を同一の条件でレーザ照射する限り、レーザ出力を高くする、あるいは走査速度を遅くすると、回復率は大きくなるものの、レーザ照射面が溶融する、あるいは短軸方向の外縁部における盛り上がりがさらに大きくなる傾向がみられた。y 軸方向の外縁部のみが大きく盛り上がっていることから、形状の異方性を考慮し、図 24 の青線で示す直線部のレーザ照射においてレーザ走査速度を速く設定してレーザフォーミングによる変形を抑え、代わりに、赤線で示す円周部においてレーザ走査速度を遅く設定してレーザフォーミングによる変形を増やすことで、短軸方向外縁部での過剰な盛り上がりを抑制しつつ、中央を回復できると考え、3つの条件で実験を行った。図 25 に実験結果を示す。図 25(a)と図 25 (c)を比較すると、曲線部分の速度を下げることで短軸側周辺部の盛り上がりをほぼ変化

させずに回復率を高くすることができた。また、図 25(a)と図 25 (b)を比較すると、直線部分の速度を上げることで回復率をほぼ変化させずに短軸側周辺部の盛り上がりを小さくできた。これらの結果は、場所毎に照射条件を変えることで短軸側の盛り上がりを抑えつつ全体の回復量を改善できる可能性を示している。

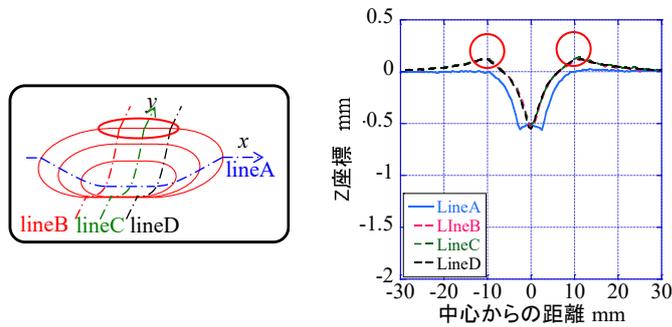


図 23 全経路を出力 300W の条件で回復した場合に生じた y 軸方向外縁部の盛り

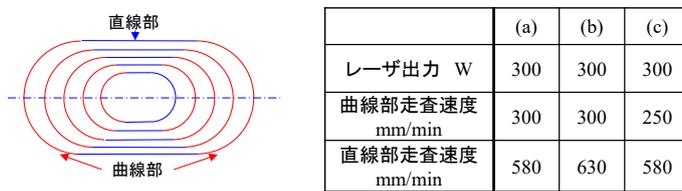
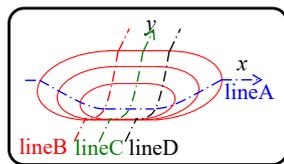
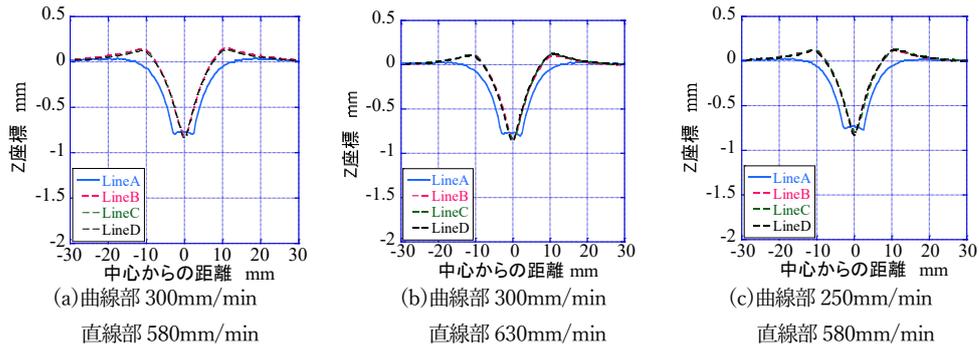


図 24 直線部と曲線部で走査速度を変えた回復実験



	(a)	(b)	(c)
曲線部走査速度 mm/min	300	300	250
直線部走査速度 mm/min	580	630	580
LineC回復率 %	49	48	51
外縁部盛り上りmm	0.141	0.112	0.13

図 25 直線部と曲線部で走査速度を変えた場合の回復

### 6.5 経路毎に異なるレーザー照射条件を適用する回復法

効果的に、楕円状の凹みを回復させるためには、直線部と曲線部とでレーザー照射条件を変えるだけで無く、5つの経路(最も外側を経路1、最も内側を経路5とする)毎にレーザー照射条件を変える必要があると考えた。図 26 に示すように、レーザー出力以外の条件を全て同じものとした上で、一つの経路だけ加工出力を 250W から 300W に増やすことで、各経路での回復が全体の回復にどのように影響するのかを明らかにした。

図 27 に示すように、外側から3番目の経路のレーザー出力のみを 300W に増やした実験3が最も回復率が高くなり、次いで、外側から4番目の経路の出力を増やした実験4と外側から2番目の経路の出力を増やした実験2において回復率が高くなった。一方、図 28 に示すように、短軸方向外縁部の盛り上がりに関してはより内側の走査経路のレーザー出力を増やすほど、盛り上がり量が増大する傾向が得られた。これより、経路2や3においてレーザー出力を増加させることが有効であることが分かった。

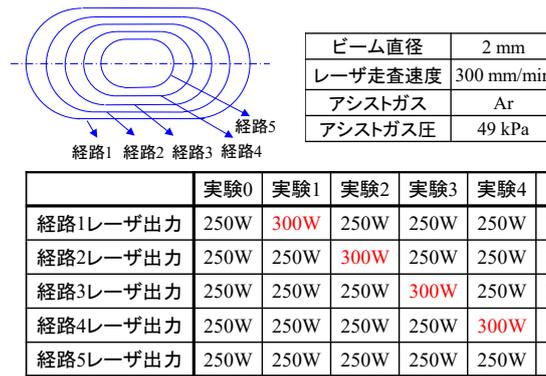


図26 経路毎にレーザー出力を変えた回復実験

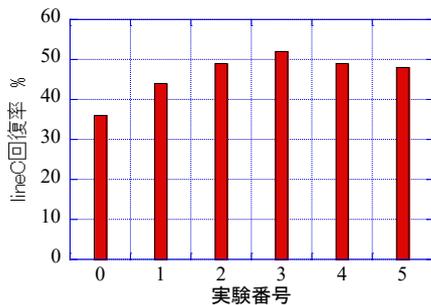


図27 各実験におけるLineCにおける回復率

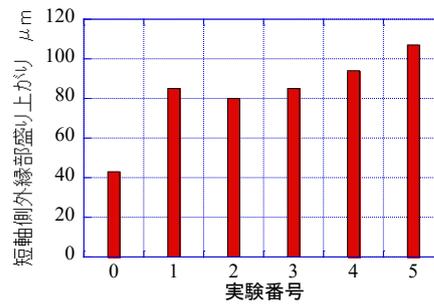


図28 各実験における短軸側外縁部の盛り上がり

## 7. 結言

本研究ではレーザーフォーミングを利用してステンレス鋼板に生じた凹状の塑性変形部の回復を試みた。レーザーを凹み外縁部の形状に沿って走査すれば凹状の塑性変形部をある程度回復できることを確認した。本手法を用いれば、凹みの生じた外板表面にレーザーを走査するのみで良く、外板を取り外す作業は必要としないため、作業時間や作業コストの削減が期待できる。今回の研究において、レーザー照射によって金属表面に生じる酸化スケールや焼き入れ効果によって金属表面に生じる硬化層については、変形回復後のパテ塗り前に行うヤスリがけによってある程度除去されるものと考えたため、今回の研究では観察していない。本研究で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) レーザフォーミングを用いて効率的に塑性変形部を回復できるレーザー照射条件を探索し、レーザーを5回照射するレーザーフォーミングの後にアシストガスを5回吹き付けて試験片を室温で冷却する過程を設けることが効率的に回復できることがわかった。
- (2) 鋼球をSUS304板に押し付けてできたすり鉢状の塑性変形部は、凸状に曲がっている外縁部と凹状に曲がっている内心部とほとんど曲がっていない中間部に分けることができ、凸状に曲がっている外縁部に対しては、変形形状に沿った複数のレーザー走査経路を設定し、それらの経路上にレーザーフォーミングによる曲げを施すことで凹みを回復することができた。
- (3) 凹状に曲がっている塑性変形部中央へのレーザーフォーミングはほとんど効果が無いことを確認した。
- (4) 厚さ1mmのSUS304板に生じた深さ1.5mm程度のすり鉢状の塑性変形部に対して、塑性変形部の外縁部から中間部に5つの同心円経路を設定し、各同心円に、出力300W、スポット直径2.0mmのレーザーを走査速度5mm/sで、乾燥空気を圧力49kPaで吹き付けながら5周照射する加熱過程の後に、乾燥空気のみを圧力49kPaで5周吹き付ける冷却過程を1セットとして、3セット繰り返した場合、変形部の深さは1.51mmから0.2mmに減少し、83%回復した。
- (5) 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。しかし、図2のように同程度の凹み(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%回復した。変形量によって出力条件を変更する必要があることがわかった。
- (6) トラック状塑性変形部において、全経路を同一の条件でレーザー照射する限り、レーザー出力を高くする、あるいは走査速度を遅くすると、回復率は大きくなるものの、レーザー照射面が溶融する、あるいは短軸方向の変形外縁部における盛り上がりが大きくなる傾向がみられた。
- (7) トラック状塑性変形部の回復を試みたところ、レーザー照射経路の中で、短軸側の直線部の走査速度をあげることで、回復率を変えずに外縁部盛り上りを小さくでき、長軸側の曲線部での走査速度を下げることで外縁部盛り上りを変えずに回復率を高くできた。

- (8) 塑性変形部の形状に沿ってレーザー走査経路を設定する場合、同一経路上に塑性変形部の曲がり方（曲率）が異なる部分がある場合、レーザー照射条件を変える必要がある。

#### 参考文献

- 1) 柳本 潤：変形加工による変形形状制御—薄鋼板の温間プレス成形、生産研究、59、5、pp.441-451 (2007)
- 2) 千徳英介、上田隆司、細川晃：レーザーによる板材の矯正加工に関する基礎的研究、精密工学会誌、74、2、pp.166-170 (2008)
- 3) T. Ueda, Y. Wakimura, T. Furumoto, A. Hosokawa, R. Tanaka: Experimental investigation on laser fluttering of sheet metal, Optics and Lasers in Engineering, 49, pp.137-144 (2011)
- 4) 難波義治、川口憲治、大峰恩：レーザーフォーミング、昭和61年精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、p.677(1986)
- 5) 難波義治、片山卓也：レーザーフォーミングの三次元熱弾塑性解析、精密工学会誌、65、9、pp.1330-1334 (1999)
- 6) F. Vollertsen: Mechanisms and models for laser forming, Laser Assisted Net Shape Engineering, Proceedings of the LANE'94, 1, pp.345-360. (1994)
- 7) 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、pp.300-305 (2001)
- 8) 佐伯守彦、榊原敦、細川健治：レーザーフォーミングのシミュレーション—第1報—板厚とレーザー径が曲げ方向に及ぼす影響、精密工学会誌、74、2、pp.160-165 (2008)
- 9) P. Cheng, Y. Fan, J. Zhang, Y. L. Yao, D. P. Mika, W. Zhang, M. Graham, J. Marte and M. Jones: Laser Forming of Varying Thickness Plate — Part I: Process Analysis, Transactions of the ASME, Vol.128, pp.634-641 (2006)
- 10) P. Cheng, Y. Fan, J. Zhang, Y. L. Yao, D. P. Mika, W. Zhang, M. Graham, J. Marte and M. Jones: Laser Forming of Varying Thickness Plate — Part II: Process Synthesis, Transactions of the ASME, Vol.128, pp.642-650 (2006)
- 11) 真鍋裕輝、西田大陸、廣垣俊樹、青山栄一、小川圭二：薄板鋼のレーザー焼入れフォーミング時の変形プロセスモニタに基づく考察、砥粒加工学会誌、62、11、pp.571-577 (2018)
- 12) 鷺坂芳弘：サブナノ秒レーザーピーンフォーミングによる薄板の球面成形、日本塑性加工学会論文誌、65、767、pp.176-181 (2024)
- 13) S. Silve, W. M. Steen, B. Podschies: Laser Forming Tubes: A Discussion of Principles, Proc. Of the ICALEO'98, Sec-E pp.151-161 (1998)
- 14) X.Y. Wang, J. Wang, W. J. Xu, D. M. Guo: Scanning path planning for laser bending of straight tube into curve tube, Opt. Laser Technol., 56, pp.43-51 (2014)
- 15) M. Safari: A study on the laser tube bending process: Effects of the irradiating length and the number of irradiating passes, Iran. J. Mater. Form., 7, pp.46-53. (2020)
- 16) 杉田淳、吉岡俊郎、中村正美、宮崎俊行、三須直史：ステンレス鋼パイプのCO<sub>2</sub>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—、砥粒加工学会誌、Vol.52、No.2、pp.36-39 (2008)
- 17) 丹後義彦、石山隆庸、鈴木博之：船殻外板の全自動曲げ加工システム“IHIMU-a”の開発、IHI 技報、51、1、pp.24-29 (2011)
- 18) S. P. Edwardson, K. Edwards, C. Carey, G. Dearden and K. G. Watkins: Laser Forming for Ship Building Application, STEEL TECH, 2, 4, pp.42-46 (2008)
- 19) 秋山哲也、篠原統紀、牧野隼人、寺崎俊夫：楕円レーザーフォーミングの収縮量に及ぼす板長と初期曲率半径の影響、溶接学会論文集、28、1、pp.22-27 (2010)
- 20) 秋山哲也、北村貴典、柿内博彦、羽田亮平、後藤晃：表裏面で直交する加熱線のレーザーフォーミングによるねじれ曲面成形における加熱順序の影響、日本金属学会誌、79、12、pp.639-643 (2015)
- 21) K. Okuda, S. Shimoyama and M. Nunobiki: Plastic Bending of Magnesium Alloy Plate by Laser Forming Process, Key Engineering Materials Vols.257-258, pp.541-546. (2003)
- 22) K. Okuda, Y. Toda, M. Nunobiki: Effect of Laser Irradiation on Bending Direction in CO<sub>2</sub> Laser Forming of Magnesium Alloy Plate, Proceedings of 7th International Symposium on Advances in Abrasive Technology, pp.513-518 (2004)
- 23) 奥田孝一、布引雅之、下山昇吾、戸田吉宣：CO<sub>2</sub>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、精密工学会誌、Vol.70、No.10、pp.1311-1315 (2004)
- 24) 奥田孝一、戸田吉宣、布引雅之：CO<sub>2</sub>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）—レーザースポット径の曲げ変形挙動に及ぼす影響—、精密工学会誌、Vol.72、No.2、pp.214-218 (2006)
- 25) K. Okuda, Y. Sugie, M. Nunobiki: Bending Deformation of Pure Titanium Plate in CO<sub>2</sub> Laser Forming, Key Engineering Material, Vols. 329, pp.625-630 (2006)
- 26) K. Okuda, H. Hayashida, M. Nunobiki: FEM ANALYSIS OF BENDING DEFORMATION IN LASER FORMING OF

Mg ALLOY, Progress of Machining Technology, Vol.8, pp.249-252 (2006)

- 27) 奥田孝一、杉江悠一、布引雅之: CO<sub>2</sub> レーザフォーミングにおける純チタン板の曲げ変形特性、砥粒加工学会誌、51、(2007) p522
- 28) Masayuki Nunobiki, Koichi OKUDA, Kousuke Hourai and Hiroo SHIZUKA: Bending of Pure Titanium Sheet to Curved Surface Shape by Laser Forming Technique, Advances in Abrasive Technology XIII, pp. 388-393 (2010)
- 29) Masayuki Nunobiki, Koichi Okuda, Toshiyuki Takagawa and Hiroo 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, pp. 725-730 (2011)
- 30) 布引雅之、蓬菜康佑、奥田孝一、静弘生: CO<sub>2</sub> レーザ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)
- 31) 新井武二: レーザ加工の基礎工学、丸善株式会社発行(2007)

兵庫県立大学大学院工学研究科研究報告 No. 78

---

令和 8 年 3 月 18 日 発行

編集者 兵庫県立大学大学院工学研究科  
〒671-2280 姫路市書写2167  
電 話 (079) 266 - 1661

発行者 兵庫県公立大学法人 兵庫県立大学  
〒651-2197 神戸市西区学園西町8-2-1  
電 話 (078) 794 - 6580

---