

フェムト秒レーザーによるレーザーピーンフォーミング

— 薄板曲げの加工特性 —

レーザー計測制御プロジェクト 鷺坂芳弘*

Laser Peen Forming with Femtosecond Laser

— Forming properties of thin-sheet-metal bending —

Yoshihiro Sagisaka

Laser peen forming is a kind of sheet metal forming using shock waves induced by short pulse laser irradiations. The author adopted laser peen forming with femtosecond laser as a thin-sheet-metal bending method. However, the forming properties of laser peen forming were unknown. In this study, some fundamental forming properties of this process were investigated. The bending efficiency was influenced by fluence, spot diameter, workpiece constraint condition, atmosphere around the workpiece, and workpiece material. In addition, bending angles were sensitive to the properties of laser. It was difficult for some materials to keep reproducibility for a long time

1. はじめに

フェムト秒レーザー（以下fsレーザー）はそのパルス幅がフェムト秒（ 10^{-15} s）単位と極めて短いことを特徴とする超短パルスレーザーである。集光されたfsレーザーは照射面に衝撃波を誘起できることが知られており、ある照射条件ではこの衝撃波を利用して金属を塑性加工することが可能である。著者はこのようなレーザー誘起衝撃波による塑性変形を薄板の曲げ加工に応用した¹⁾。

本法はレーザーピーンフォーミング（以下LPF）と呼ばれており、スプリングバックの影響が小さく、多品種少量生産に適するといった長所を持っている²⁾。しかし、LPFの加工特性についてはこれまで詳細な報告が無く、fsレーザーではどのようなパラメータで加工すればよいか不明であった。そこで本法の基礎的な成形データを得ることを目的として、各種材料について加工特性への照射条件の影響、および加工の再現性を検討した。

2. 加工原理

fsレーザーを金属板表面に集光照射すると照射表

面は瞬間的にイオン化、除去され、高圧のプラズマが発生する（レーザーアブレーション）。プラズマは急速に膨張しようとするが、雰囲気中の慣性力が膨張を妨げるため、板にも圧力がかかり、衝撃波が伝播する。一般に水中では水の慣性力が大きいので、空気中の10～100倍の圧力が得られるといわれている。照射面は衝撃波の圧力によって、板厚方向に圧縮されるとともに板面方向に延ばされて図1のような塑性変形が発生する。レーザーを走査させてこの変形を蓄積させると板を照射面が凸となる方向に曲げることができる。

fsレーザーは出力が小さいため、大型部品の曲げ加工には適さない。しかし、熱影響が極めて小さいため、熱による変質を嫌う微細部品や薄板の曲げには有用である。さらに比較的の低いエネルギーで衝

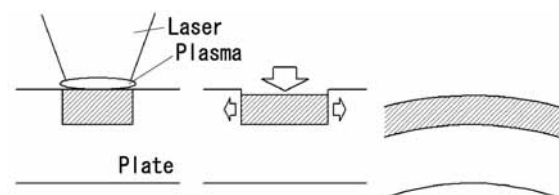


図1 LPFの加工原理

*) 現 工業技術研究所

【報告】

撃波を誘起できるため、板表面に吸収層を被膜する必要が無く、アブレーションによる照射面の除去量も抑えられるという利点もある。

3. 実験方法

実験に用いたレーザーはチタンサファイア発振のfsレーザーで、中心波長800nm、パルス幅80fsである。繰返し発振周波数は500Hzとした。実験装置の概略を図2に示す。照射エネルギーはNDフィルターで調整し、パルスエネルギーEで定義した。レーザー光は焦点距離 $f=35\text{mm}$ のレンズを通して試験片に集光照射される。装置には透明容器製の水槽を取り付けることができ、水槽内に沈めた試験片に照射することで水中での加工も可能である。これによって雰囲気の影響も調査した。

図3に実験方法の概略を示す。試験片には板厚 $t=0.1\text{mm}$ の純アルミ (A1100)、 $t=0.05\text{mm}$ のリン青銅 (C5191) とステンレス鋼 (SUS304)を図の寸法にせん断して用いた。本法はスプリングバックの影響が小さいので、バネ材の加工に有用である。そこで典型的なバネ材であるリン青銅とSUS304を用いた。供試材料の材料特性を表1に示す。図3のA枠内の斜線部にレーザーを走査させて曲げ加工を行った。試験片に予備曲げを与えて加工すると照射面の引張りの曲げ応力が変形を助長することがわかっているため¹⁾³⁾⁴⁾、予備曲げなし (図3(a)) と予備曲げ (図3(b)) の2種類の拘束条件を比較した。予備曲げの際は試験片を予備曲げ角 $\theta_0=10^\circ$ に曲げて拘束した状態で加工した。照射経路の概略を図4に示す。スポット径 d はデフォーカス量 z を変えることで調整した。集光点を z の原点とし、試験片を光源

側にデフォーカスしたときは z を正と定義した。走査速度は 5mm/s としたので、照射ピッチ p_1 は $10\mu\text{m}$ 一定である。照射ピッチ p_2 はプログラム中で $100\mu\text{m}$ 一定とした。

4. 実験結果および考察

4.1 純アルミの成形特性

予備曲げ無しの場合での水中および空気中でのデフォーカス量 z に対する曲げ角 θ の変化を図5に、予備曲げの場合での変化を図6に示す。すべての条件でパルスエネルギーEが大きいくほど θ は大きくなった。いずれも空気中では集光点付近で曲げ効率が高いのに対し、水中ではより光源側で曲げ効率が高く

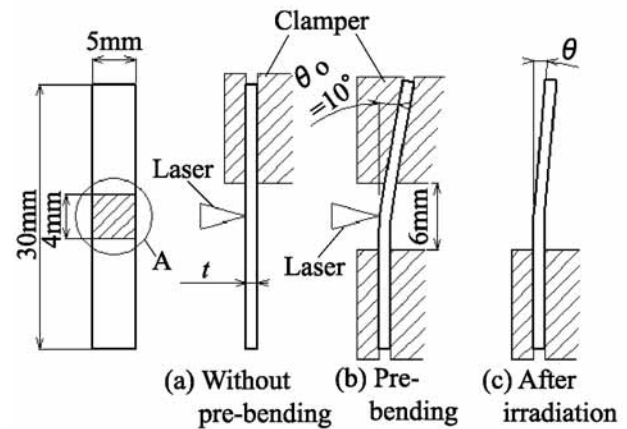


図3 実験方法概略

表1 供試材料の材料特性

材料	Hv	熱伝導率	吸収率(800nm)
A1100	50	239(W/mK)	25%
C5191	236	133(W/mK)	10% (Cu)
SUS304	440	16.3(W/mK)	42% (Fe)

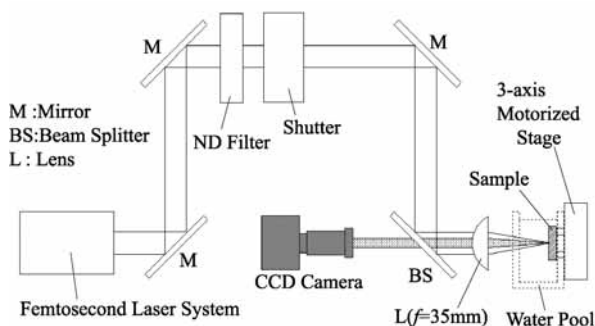


図2 実験装置概略

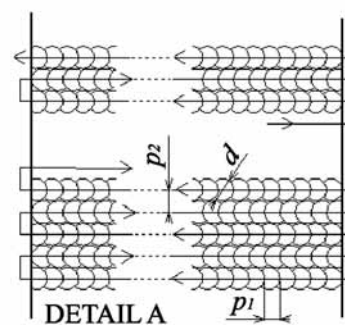


図4 照射経路

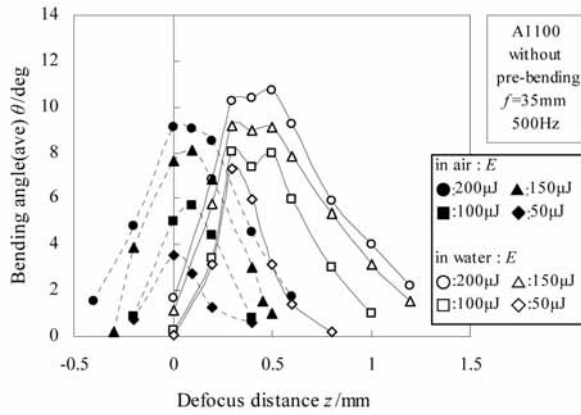


図5 予備曲げ無しでの曲げ角

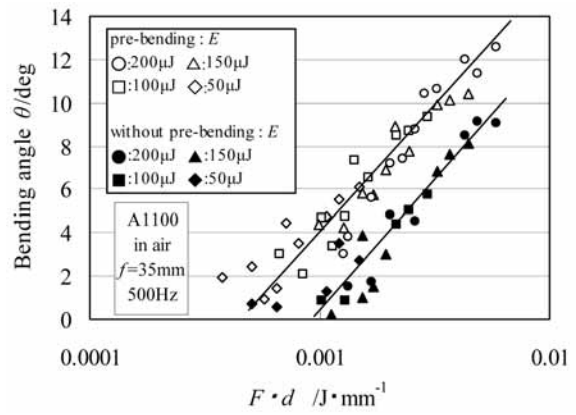


図8 曲げ角とフルエンス・スポット径の関係

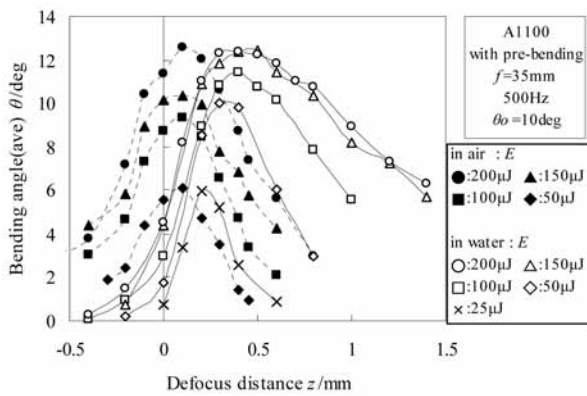
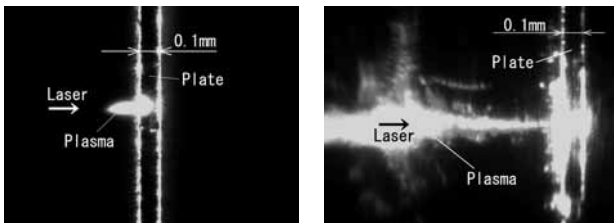


図6 予備曲げ有りでの曲げ角

集光点付近では十分な衝撃波を誘起できず、変形量が低下したと考えられる。一般のパルスレーザーでは水中の方が大きい衝撃波が得られるとされるが、fsレーザーで水の効果が得られるのは z が大きいとき、あるいはパルスエネルギー E が小さいときのみで、つまりフルエンス F （単位面積あたりのパルスエネルギー）の小さいときのみといえる。

また、水中ではレーザーのビーム特性が変化した際に θ の変化が大きいことが判明した⁴⁾。その原因として、ビーム特性の変化で水中光路におけるエネルギー消費量のばらつきがあげられる。そのため、fsレーザーを使った水中での加工は再現性の面で実用的でないといえる。

一方、空気中での加工特性はビーム特性の変化に対して比較的安定していた。既報³⁾にて空気中では θ はフルエンス F およびスポット径 d と相関があることが判明している。そこで、 $F \cdot d$ をパラメータとして空気中での θ との相関を調べた。 d の値は既報で報告した値^{3,4)}を用いた。図8に結果を示す。 θ は概ね $F \cdot d$ の対数に比例しており、効率の点では高フルエンスで大きいスポットをもって加工することが望ましい。また、 θ への予備曲げの影響は図8より明らかで、予備曲げを与えることで曲げ効率が向上することが確認された。



(a) 空気中 (b) 水中

図7 プラズマ外観の比較（パルスエネルギー150 μJ）

なった。水中では衝撃波が大きくなるとされているが、その効果が見られたのは z が大きいときのみといえる。

空気中と水中で集光点付近に現れるプラズマを側方から観察した。図7に比較を示す。板の左面は集光点に合わせてある。プラズマは板から吹き出したものではなく、雰囲気レーザーに反応して現れたものである。水中では極端に広い範囲で反応が起こっており、レーザー光は試験片に届く前にエネルギーの大部分を消費してしまうと推定される。このため

4. 2 バネ材の成形特性

リン青銅とSUS304について同様の実験を行った。パルスエネルギー E が大きいほど θ が大きくなる傾向は純アルミと同じであったが、これらの材料では予備曲げの効果はごくわずかしか現れなかった。板

【報告】

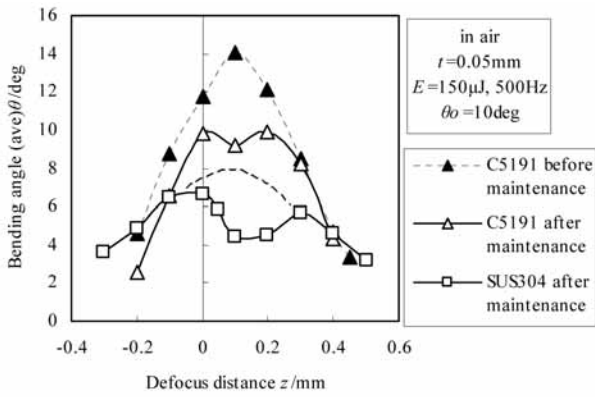


図9 バネ材での曲げ角

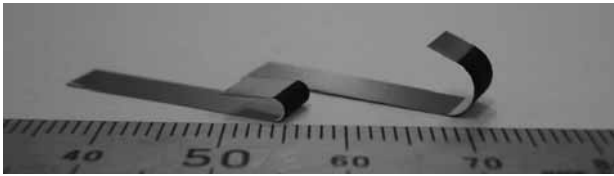


図10 SUS304ビーム特性の影響($z=0.1\text{mm}$)

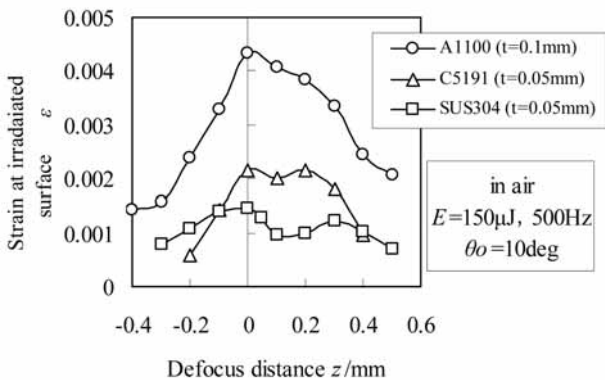


図11 材質による照射面平均ひずみ量の比較

厚が薄く、かつ降伏応力が高いため、予備曲げによって生じる曲げ応力の効果が相対的に低下したためである。また、水中ではいずれも照射面が凸となる曲げは生じず、むしろ若干逆に曲がる場合もあった。水中でのエネルギー消費によって照射面で降伏応力を超えるほどの衝撃波が起きなかったためと考えられる。空気中では曲げ変形が得られるので、fsレーザーでは空気中で加工する方が有利といえる。

リン青銅とSUSを空気中で加工したところ、これらの材料の曲げ角は空気中でもビーム特性の変化に敏感であることが判明した。図9は発振装置の整備前後でのデフォーカス量 z に対する θ の変化を比較したものである。リン青銅では整備前に最も曲げ効率の高かった集光点付近の θ が整備後減少してし

まった。純アルミのようにフルエンスによって変形が支配されているとはいえない。SUS304については整備前の θ のデータを採取できなかった。しかし、SUS304を整備前後で同じ加工条件で加工したものを比較すると図10のように整備後極端に変形量が小さくなっていた。よって、整備前は図9の破線のような変化をしており、それが実線のように変化したと考えられる。SUSの方が広い範囲で θ が減少しており、影響度が大きいといえる。

発振装置の整備によって大きく変化したビーム特性はビームプロファイルであったことが判明している。熱応力を利用するレーザーフォーミング⁵⁾という曲げ加工法があるが、これでは熱伝導率の低い材料ほど曲がりやすく、曲げの方向はLPFと逆である。fsレーザーでもフルエンスが高いと熱影響が現れてくることが知られている。また熱伝導率が小さい材料ほど加工特性の変化が顕著であったので、プロファイルが変化したことでレーザーフォーミングの効果が現れたと推定される。しかし、まだこの現象の詳細なメカニズムは解明できていない。

このようなビーム特性の変化はfsレーザーではある程度避けられないので、バネ材では長期的に再現性を維持するために何らかの製品形状の管理やフィードバックが不可欠である。

また、整備後の曲げ角から、裏面のひずみを0と仮定して照射面の平均ひずみを計算した。図11に材料による比較を示す。総じて変形抵抗の小さい材料ほど曲がりやすいといえるが、デフォーカスが大きいときにリン青銅とSUS304の結果が反転しているので、スポットが大きいときはレーザーの吸収率も影響すると思われる。一般に耐力が0.3%のひずみ($\epsilon=0.003$)が生じる応力で定義されることを考えると、本法は弾性限界付近の極めて小さい塑性ひずみを制御しているといえる。

5. まとめ

フェムト秒レーザーによる薄板の曲げ加工について基礎的な加工特性の検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 予備曲げによって曲げ効率は向上するが、変形抵抗の小さい材料ほど効果が顕著で、変形抵抗

が大きくなると効果が低くなる。

- 2) fsレーザーでは水中での加工は再現性が低く、加工効率も劣るため、空气中で加工することが望ましい。
- 3) 純アルミニウムを空气中で加工した場合、フルエンスとスポット径が大きいほど曲げ効率は向上する。
- 4) バネ材では曲げ効率へのビーム品質の影響が大きく、再現性を維持するには製品形状の管理を行う必要がある。

参考文献

- 1) 鷺坂芳弘：フェムト秒レーザー誘起衝撃波による薄板の逐次曲げ加工，静岡県工業技術研究所研究報告，1，117-118(2008).
- 2) 鷺坂芳弘：フェムト秒レーザーによるレーザーピーンフォーミング，静岡県工業技術研究所研究報告，2，202-203(2009).
- 3) 鷺坂芳弘他：フェムト秒レーザーを用いたレーザーピーンフォーミングによる薄板の曲げ加工，塑性と加工，50-584，866-870(2009).
- 4) 鷺坂芳弘他：フェムト秒レーザーによるレーザーピーンフォーミング，精密工学会誌，75-12，1449-1453(2009).
- 5) 大津雅亮他：板材のレーザーフォーミング，塑性と加工，42-489，1031-1034(2001).