

# 金属極細線のパルスレーザ曲げメカニズムの解明とCNCマイクロ加工への応用

静岡大学工学部 機械工学科

教授 田中繁一

(平成20年度一般研究開発助成 AF-2008204)

キーワード：レーザフォーミング，金属極細線，マイクロ成形

## 1. 研究の目的と背景<sup>1)-5)</sup>

近年，医療や工学の分野ではMEMS等を実現する微細加工技術に注目が集まっている．一方，現在の引抜き加工によれば直径10 $\mu$ mオーダーの金属極細線が安定して得られ，その結晶粒径は小さく強度的にも優れている．この極細線を利用すれば，高強度で信頼性の高いマイクロ構造物可以实现できる．また，レーザ成形は非接触かつフレキシブルな有望な加工法であるが，金属極細線のレーザ曲げに関する報告は少なく，その変形挙動や正確なメカニズムも明確でない．

図1は，提案されているレーザフォーミングにおける3つのメカニズムである．(b)および(c)の座屈メカニズムとすえ込みメカニズムは局所加熱部位が周辺材料により十分に拘束される必要があり，線材においては利用が困難である．一方，(a)の温度勾配メカニズムにおいても断面形状が円形で小さい線材では，そのメカニズムを発現させるのは必ずしも容易ではない．

本研究では，最初に，100 $\mu$ mの金属極細線へレーザをパルス照射して局所加熱したときの素材の変形挙動を，熱連成弾塑性有限要素シミュレーションを用いて詳細に調べた．これにより，板材に比較して，丸棒のレーザ成形が容易でないことを確認するとともに，各加工パラメータが変形挙動に及ぼす影響を調べた．また，スポットを横断走査するプロセスを提案して，その有用性を検討した．さらに，直径100 $\mu$ mのステンレス鋼極細線のレーザ成形実験装置を製作して，パルス照射実験およびスポット走査実験を行い，それらにおける変形挙動の詳細と有用性を検討した．

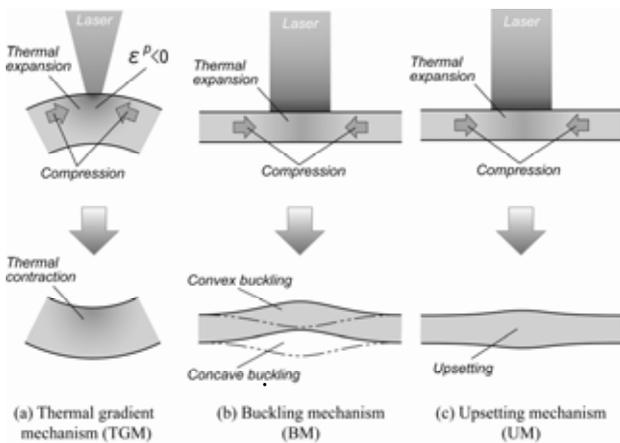


図1. レーザフォーミングの3つのメカニズム<sup>(2)</sup>

## 2. 金属極細線レーザ曲げのFEM解析

### 2.1 計算モデル

FEM解析には，商用ソフトウェアMARC2005R3を用いた．図2は計算に用いたメッシュモデルである．レーザはガウシアンビームとし，これを熱流束境界条件に適用した．斜面への入熱においては面の方向余弦に基づく補正係数を適用した．その他の計算条件を表1に示す．表2は，計算に用いた材料特性値で，それぞれにおい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．

図3は，パルス形状を示している．強度が照射時間 $T$ 内で一定のPulse-を基本としたが，強度が時間的に直線的に減少あるいは増加する場合についても計算を実施した．レーザは図4(a)のように素材中央に照射したが，他に，同図(b)のようにスポットを横断走査する新しいプロセスについても検討を行なった．

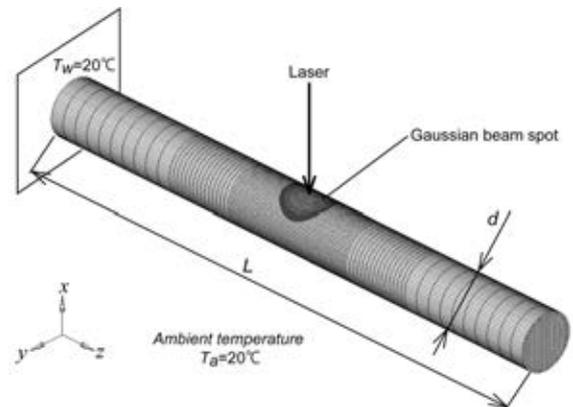


図2. FEMメッシュモデル ( $d=0.1$  mm,  $L=1.0$  mm)

表1 計算条件

Power : $P$	2.5 - 5 W
Spot diameter : $a$	0.025 - 0.1 mm
Scan velocity : $v_s$	0.100 - 2.000 m/s
Heat transfer coefficient : $\alpha$	10 W/m <sup>2</sup> K

表2 材料特性

Young's modulus : $E$ <sup>(6)</sup>	103 - 193 GPa
Poisson ratio : $\nu$ <sup>(6), (7)</sup>	0.29 - 0.362
Thermal expansion : $\alpha$ <sup>(8)</sup>	13.6 - 18.9 K <sup>-1</sup>
Heat conductivity : $\lambda$ <sup>(9), (10)</sup>	8.36 - 13.8 kW/m $\cdot$ s
Specific heat : $c$ <sup>(11), (12)</sup>	0.50 - 0.64 kJ/kg $\cdot$ K
Yield stress : $\sigma_y$ <sup>(13)</sup>	76 - 270 MPa

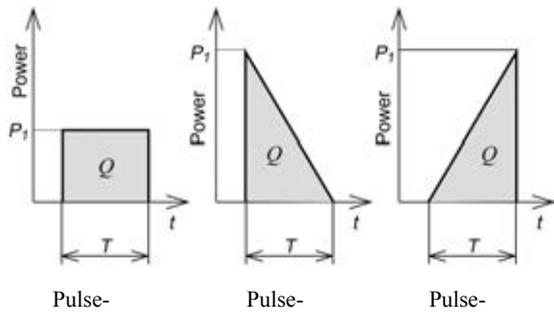


図 3 . パルス形状

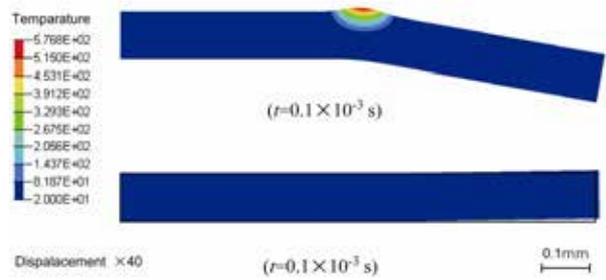


図 5 . 計算結果 (Spot diameter:  $a=0.10\text{mm}$  ( $a/d=1.0$ ), Irradiation time:  $T=0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=2.5\text{W}$ )

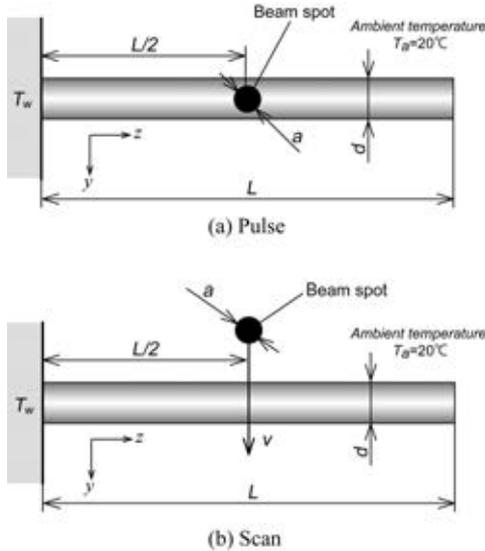


図 4 . レーザ照射条件

## 2・2 計算結果

### 2・2・1 スポット径が曲げ変形に及ぼす影響

図 5 は、材料と同径のレーザーで局所パルス加熱した例である。パルス幅は  $0.1\text{ms}$  で出力は  $2.5\text{W}$  である。素材は、加熱とともに上に凸に曲がり、冷却後、わずかに凹向きの曲げが残留する。一方、図 6 は、材料中央の縦中心線上での温度、軸方向応力、塑性ひずみ、および曲げ角の時間変化を示している。曲げ角は、加熱時には大きく減少するが、冷却後には相対的に非常に正値が残留する。図 7 は、素材中央の横断面における加熱終了時の温度分布と軸方向応力、および冷却後の軸方向塑性ひずみ分布である。温度分布の等高線はほぼ水平であり、ヒンジ的変形時の下方部位の抵抗のみで表層部に圧縮塑性ひずみが生成している。

図 8 は、スポット径を  $0.025\text{mm}$  とした場合の結果である。温度分布の等高線は水平でなくなり、高温部は頂部に局在している。応力分布も加熱表面から少し下方で大きな圧縮応力が生じ、その両側部がそれを拘束している。加熱中は上記結果と同程度の凸変形をしているが、冷却後の残留曲げ角は大きい。

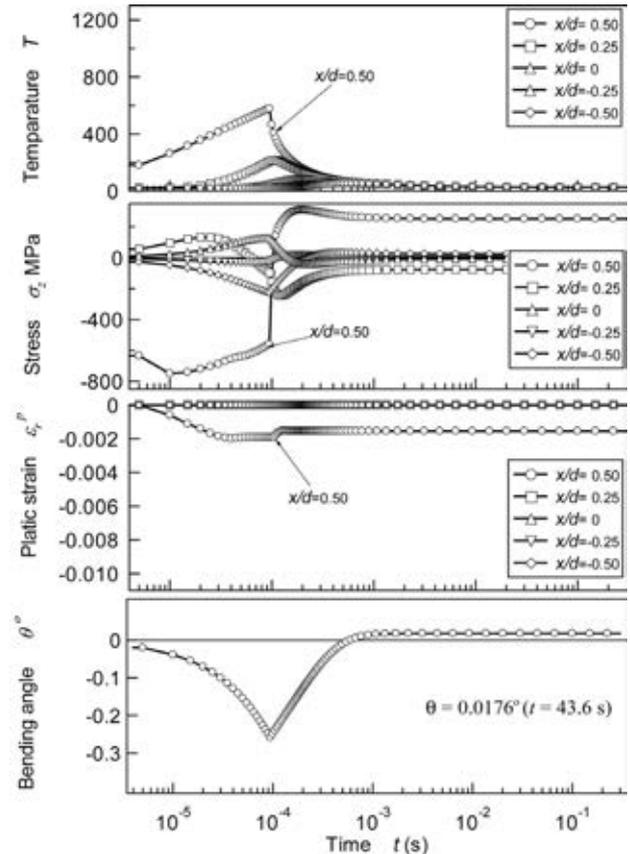


図 6 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$  ( $a/d=1$ ), Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=2.5\text{W}$ )

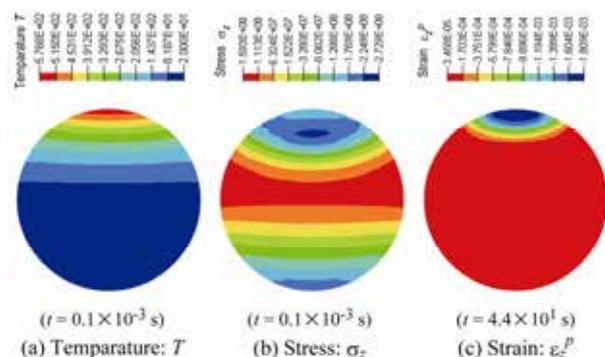


図 7 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$  ( $a/d=1$ ), Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=2.5\text{W}$ )

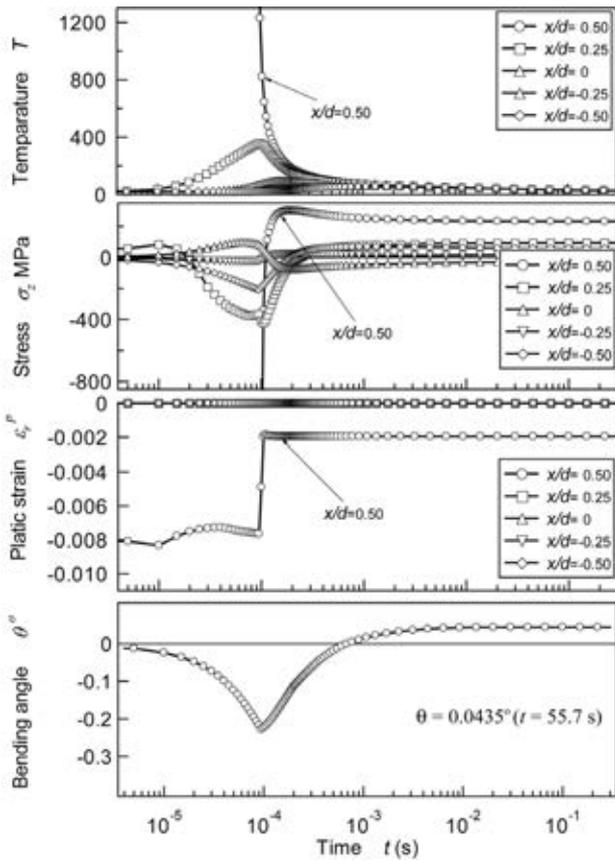


図 8 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.025\text{mm}$  ( $a/d=0.25$ ), Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=2.5\text{W}$ )

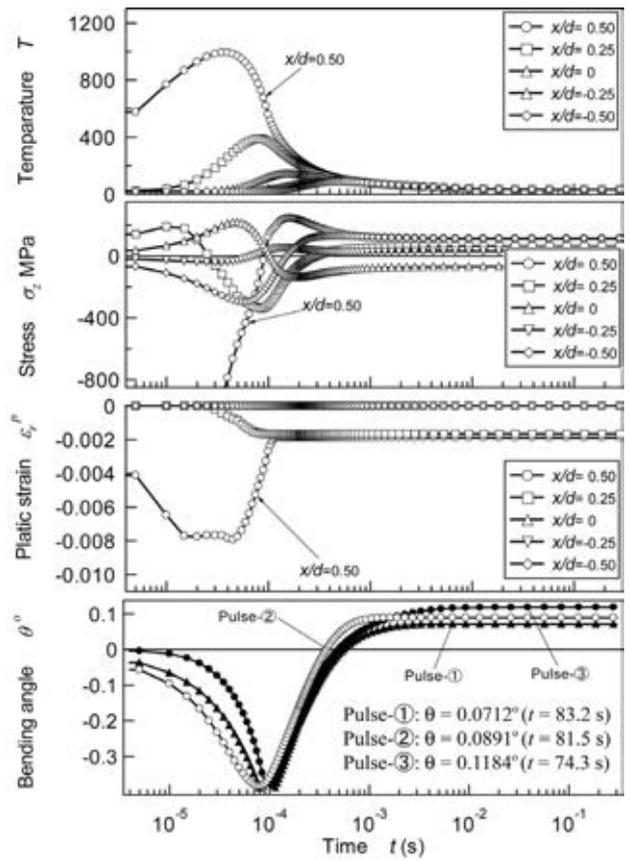


図 10 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$ , Pulse- in Fig.3, Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=5.0\text{W}$ )

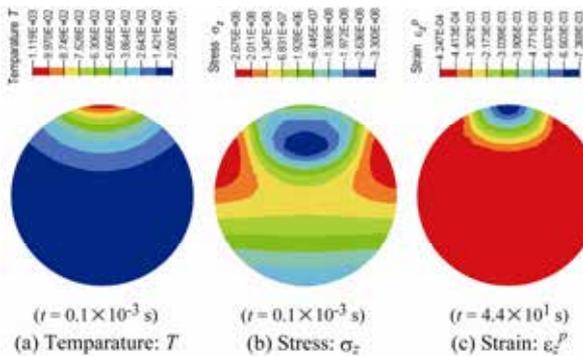


図 9 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.025\text{mm}$  ( $a/d=0.25$ ), Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=2.5\text{W}$ )

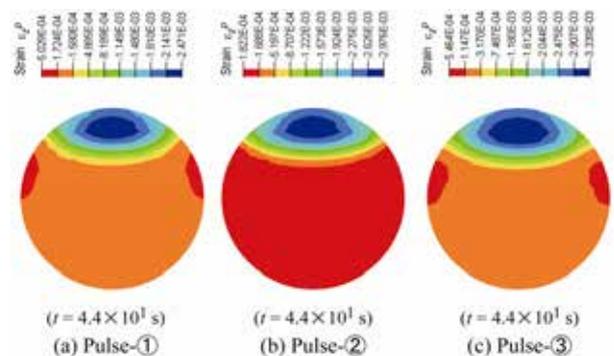


図 11 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$ , Pulse- in Fig.3, Irradiation time:  $T = 0.1 \times 10^{-3}\text{s}$ , Power:  $P=5.0\text{W}$ )

### 2・2・2 パルス形状が曲げ変形に及ぼす影響

図 10 および 11 は , パルス形状を図 3 中の Pulse- として示したときの結果である . 加熱表面の温度は照射終了前に下がり始める . 図 10 最下段の曲げ角のグラフでは 3 つのパルス形状の結果を重ねて示している . この計算においては , 三者の投入エネルギー量  $Q$  はほぼ同じであるが , Pulse- の最終曲げ角は , Pulse- の結果よりも若干大きく , Pulse- ではさらに大きい . また , 図 11 に示す最終的な中央横断面での塑性ひずみ分布は類似しているが , (c) の Pulse- の圧縮ひずみは他者よりも大きい .

### 2・2・3 スポット走査が曲げ変形に及ぼす影響

図 12 および 13 は , スポットを横断走査したときの結果である . 図 13 中で , スポットは左から右へ移動している . 温度分布は照射位置を中心に広がっており , 分布はスポットの移動に追従している . 一方 , 応力  $\sigma_z$  の分布は非対称でかなり複雑であり , 曲げひずみを生み出す圧縮応力域はスポットの移動と共に内部に沈み込んでいる .  $1\text{m/s}$  のスポット走査では , 表面層の圧縮応力および圧縮塑性ひずみの最大値はパルス照射の場合よりも小さいが , 最終的には , ほぼ同じ大きさの曲げ角が生成する .

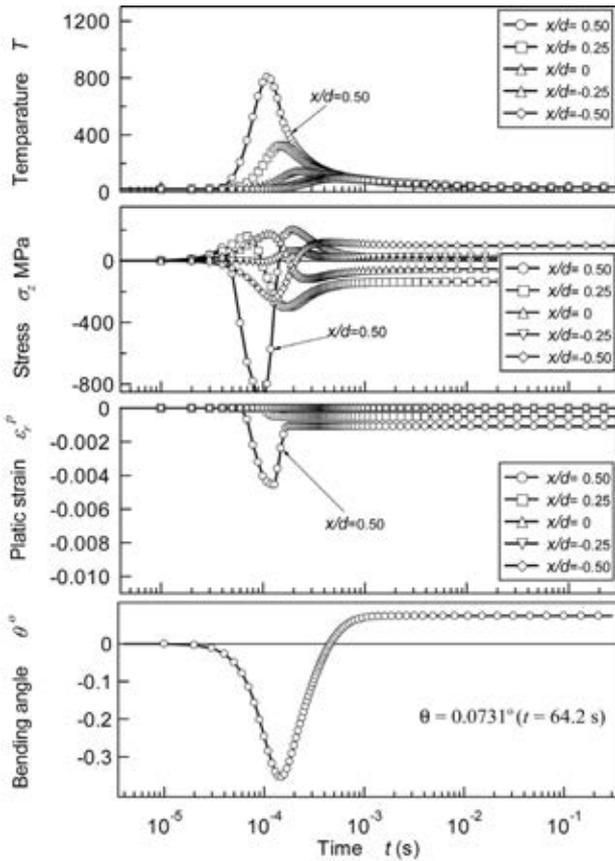


図 12 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$ , Scan velocity:  $v = 1.0\text{ m/s}$ , Power:  $P=5.0\text{W}$ )

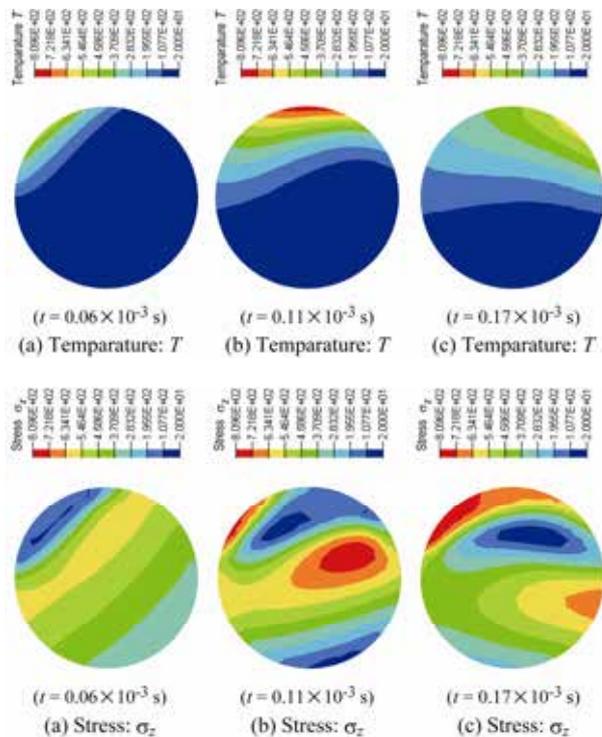


図 13 . 計算結果(Spot diameter:  $a = 0.1\text{mm}$ , Scan velocity:  $v = 1.0\text{ m/s}$ , Power:  $P=5.0\text{W}$ )

### 3 . 金属極細線のレーザ曲げ実験

#### 3・1 レーザ曲げ実験装置

金属極細線のレーザ曲げ実験を行なうために、図 14 の実験装置を製作した。レーザ光源は波長 1090nm のファイバーレーザ(SPI 製)で、コリメートされた 5mm の並行光を 5 倍の対物レンズを通して材料上に集光した。材料は加熱酸化を避けて不活性ガス中実験ができるように、チャンバー内に設置した。したがって、レーザはサファイア窓を通して照射される。また、材料はチャンバー内で XYZ 方向に自動位置決めされる。さらに、スポットを 2 軸方向に微小走査するために、光路途中に 2 台のピエゾチルトミラーを設置した。実験には、主に直径 100 $\mu\text{m}$  長さ 50mm のステンレス鋼矯正線材を用いた。その他の実験条件を表 3 に示す。

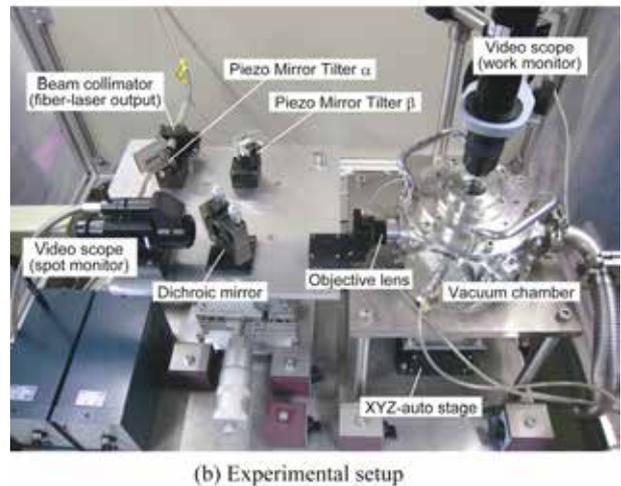
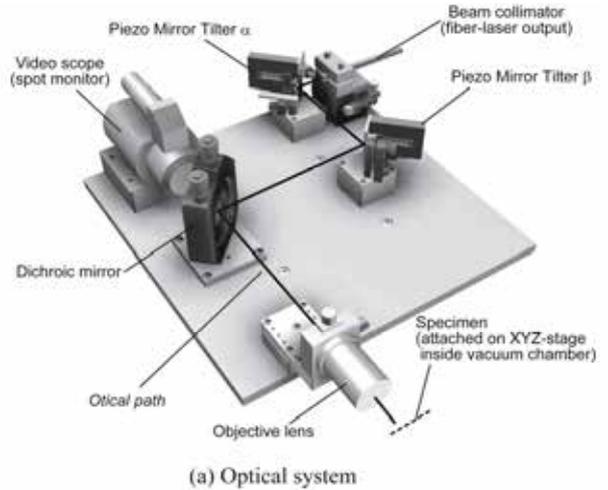


図 14. 金属極細線マイクロレーザ曲げ実験装置

表 3 実験条件

Laser: fiber laser (SPI Lasers Ltd.)	
Wavelength : $\lambda$	1090 $\pm$ 5 nm
Rated Output Power : $P$	20 W
Maximum modulation speed : $f$	50 kHz
Diameter of delivery beam : $D_0$	5 mm
Objective lens:	$\times 5$

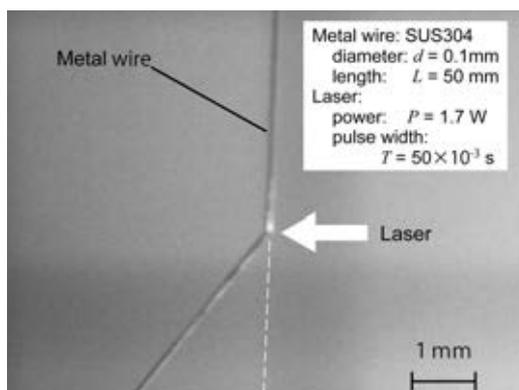


図 15. パルス照射による凸曲げ変形  
( Power:  $P=1.7\text{W}$ , Pulse width:  $T=50 \times 10^{-3}\text{s}$ ,  
Number of irradiations:  $N=500$ )

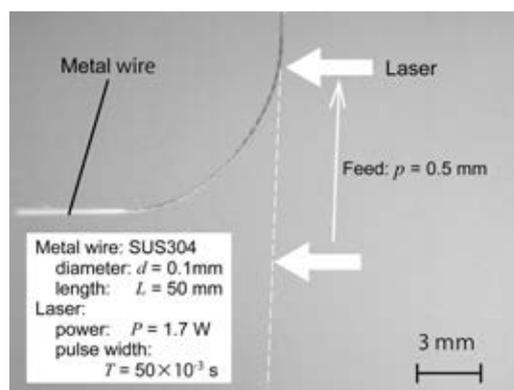


図 17. 移動パルス照射による簡易 CNC 2 次元曲げ  
( Power:  $P=4.9\text{W}$ , Pulse width:  $T=1 \times 10^{-2}\text{s}$ ,  
Number of irradiations:  $N=30$ )

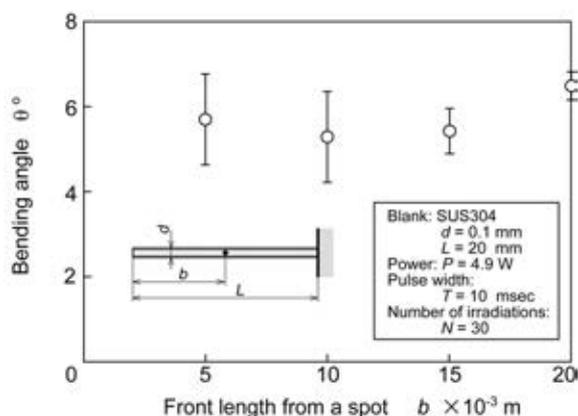


図 16. 自由端長さが曲げ角に及ぼす影響  
( Power:  $P=4.9\text{W}$ , Pulse width:  $T=1 \times 10^{-2}\text{s}$ ,  
Number of irradiations:  $N=30$ )

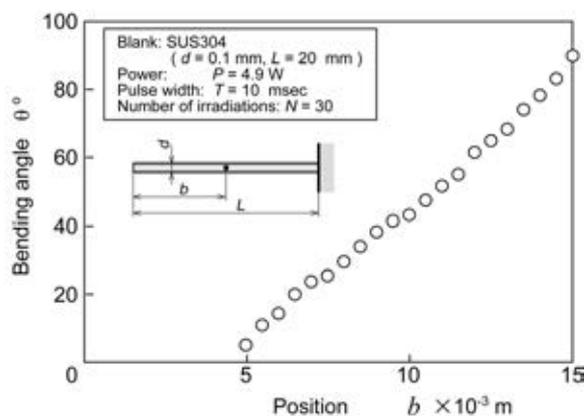


図 18. 移動パルス照射による曲げ形状  
( Power:  $P=4.9\text{W}$ , Pulse width:  $T=1 \times 10^{-2}\text{s}$ ,  
Number of irradiations:  $N=30$ )

### 3・2 実験結果

#### 3・2・1 パルス照射実験

図 15 は、直径 100 $\mu\text{m}$  のステンレス鋼(SUS304)線材を、出力 1.7W、パルス幅 50ms のレーザーで 500 回照射したときの結果である。明らかに、図 1(a)の温度勾配メカニズムとは逆方向に曲がっている。再現性のあるこの現象は他の研究者によっても報告されているが、そのメカニズムの詳細は明らかでない。また、この挙動は照射点から自由端側の長さに影響を受けるとの報告もあるが、今回の実験では図 16 のように、ばらつきは大きくなるが明確な差異はなかった。

図 17 は、素材位置を XYZ 自動ステージを制御して、パルス照射点を移動させながら円弧形状に成形した例である。照射点の軸方向送りピッチは 0.5mm で、各点でのパルス照射数は 30 である。図 18 はその曲げ角の分布であるが、ほぼ直線的に曲げ角が増加しており、各部位で再現性よく曲げ成形が行なわれたことを裏付けている。

#### 3・2・2 スポット走査実験

図 14 中の、ピエゾチルトミラーを用いた微小走査により、図 19 のスケジュールでスポット走査実験を行なった。スポットは、素材上を横切って繰返し往復するが、反転位置を素材上に置くとその時点での入熱が過大となるために、スポットは、素材直径よりも大きな範囲を往復する。その結果、レーザーが素材にあたらない休止期間  $T_i$  が存在する。

図 20 は、走査速度を 10~90mm/s と変化させた場合の曲げ角を示している。走査回数は 5000 である。走査速度の増大は加熱時間を小さくし温度勾配を大きくするが、一方で入熱量が小さくなるので曲げ角が減少する。また、各曲線は、休止期間  $T_i$  を変えた場合の結果である。休止期間が増大すると曲げ角は減少する。

図 20 は、走査数が 5000 のときの曲げ変形部位である。照射部では熱軟化した材料が外へ押出されながら曲げ変形が生じている。

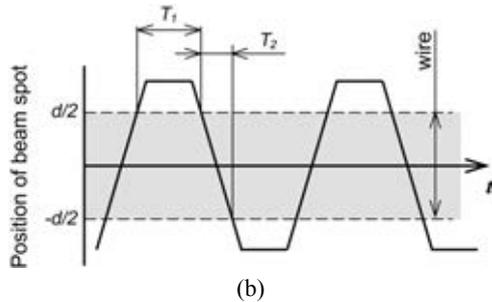
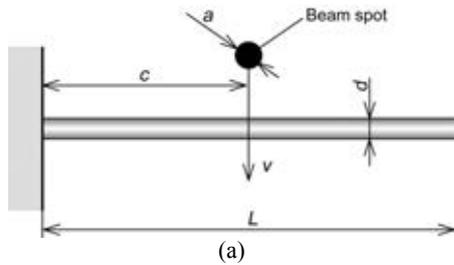


図 19 . スポット走査スケジュール

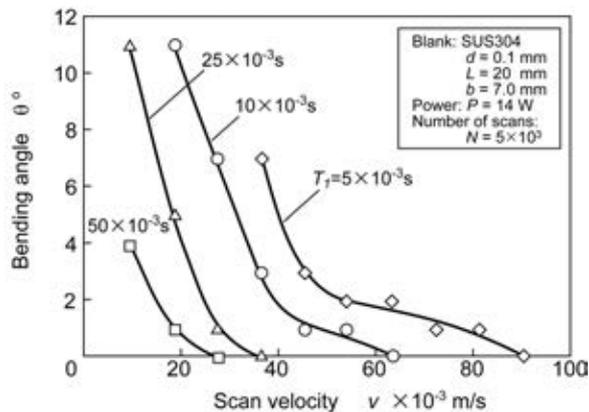


図 20. スポット走査速度と休止期間が曲げ角に及ぼす影響

(Power:  $P=14W$ , Number of scans:  $N=5 \times 10^3$ )

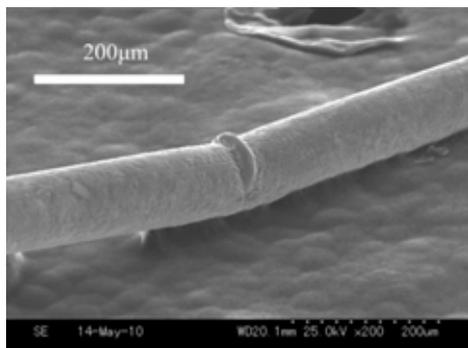


図 21. スポット走査を用いたレーザー曲げ成形部位

(Blank: SUS304, Diameter:  $d = 0.1mm$   
Power:  $P=14W$ , Number of scans:  $N=5 \times 10^3$ )

#### 4 . まとめ

本研究では,金属極細線へレーザをパルス照射して局所加熱したときの素材の変形挙動を,熱連成弾塑性有限要素シミュレーションを用いて調べた。また,微小スポットを横断走査するプロセスを提案して,その有用性を検討した。さらに,ステンレス鋼極細線のレーザー成形実験装置を製作して,パルス照射およびスポット走査実験を行い,それらの変形挙動を調べた。

a) スポットサイズが素材径に対して十分小さい場合には,温度上昇域が局所化するとともに両側部の拘束により大きな塑性ひずみを該当部位に導入できる。

b) スポットの横断走査により,パルス照射と同等の塑性ひずみを導入して曲げ成形を行なうことができる。

c) ステンレス鋼極細線へのパルス照射では,温度勾配メカニズムとは逆の曲げ変形が生じるが,照射点を移動制御することにより曲線形状の曲げが可能である。

d) スポット横断走査プロセスでは,温度勾配メカニズムに従う向きの曲げ変形が生じ,走査回数により曲げ角を制御できる。

また,レーザのパルス幅が数 ns オーダーに単パルス化した場合には素材の慣性は無視できず,動的な効果が曲げ挙動に大きく影響すると思われる。

#### 参考文献

- 1) Y. Namba: Proceedings of the International Conference on Lasers, C. P. Wang et. Al. eds., STS Press, Las Vegas, NV, (1986), 403-407.
- 2) K. Geiger, F. Vollertsen: Ann. CIRP, 42 (1993), 301-304.
- 3) G. Chen, X. Xu, C. C. Poon, A. C. Tam: ASME J. Manuf. Sci. Eng., 66-September (1999), 772-779.
- 4) Shakeel Saffar, Lin Li, M.A. Sheikh, Zhu. Liu: ASME J. Manuf. Sci. Eng., 129-June (2007), 592-600.
- 5) Me. Sistaninia, Ma. Sistaninia, H. Moeanodini: Computational Material Science, 45 (2009), 480-488.
- 6) S.S. Lee, U-S. Min, B. Ahn and S.H. Yoo, J. Materials Science, 33 (1998), 687.
- 7) H.M. Ledbetter, J. Applied Physics, 52-3, March (1981).
- 8) N. Yamada, M. Okaji and Y. Miki, The Fourth Asian Thermophysical Properties Conf., Tokyo, (1995), 441.
- 9) L. Filoni and G. Rocchini, High Temperatures-High Pressures, 19 (1987), 381.
- 10) R.P. Tye, R.W. Hayden, S.C. Spinney, High Temperatures -High Pressures, 4 (1972), 203.
- 11) NIST Cryogenic Technologies Group, Bolder Co; W. Poessnecker, U. Gross, High Temperatures-High Pressures, 34 (2002), 1.
- 12) 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.