

スパークフォーミングによる薄板のマイクロ曲げ加工

大津雅亮*

1. はじめに

近年、機械部品や電気部品の小型化と同時に成形形状の高精度化の要求も高まっている。板材成形品は同じ形状の部品でも相似的に寸法が小さくなると、それに合わせて板厚も薄くなるため、スプリングバックの影響が大きくなる。そのために微小部品の曲げ加工製品では、大きな寸法の製品では得られた曲げ加工精度が得られなくなる。特に磁気ディスクヘッドの支持アームのような薄板ばね材の曲げ加工においては、高精度の曲げ角の調節が必要であるが、外力を用いた曲げ角の微調整法ではスプリングバックが非常に大きいため容易ではない。

外力を用いない曲げ加工法のひとつにレーザーフォーミングがある¹⁾。レーザーフォーミングでは板材にレーザーを照射して板厚方向に大きな温度差を発生させて、温度差による熱応力を利用して曲げ加工しているためにスプリングバックがなく、マイクロ曲げ加工においても変形量の調整がしやすい。しかし、レーザー装置や維持費が高価であり、より安価な加工法の開発が求められている。

スパークフォーミング²⁾では薄板表面に火花放電を発生させ、放電による発熱を利用して板厚方向に大きな温度差を発生させて、熱応力を利用して板材を成形する。スパークフォーミングに使用する主な機器は直流電源とコンデンサーのみであるため、装置や維持費が安価である。成形精度も板幅が小さな薄板への単発放電においては 0.01° 以下の微小角度の曲げ加工が可能であり、板幅が大きい場合には放電位置を移動させながら多点放電を行うことにより曲げ加工が可能である。

本研究では、まずスパークフォーミングにおける加工現象に関する考察を行うため、被加工材表面に生じる放電痕を観察し、有限要素解析を行って加工中の箔材の変形挙動や温度分布、応力分布について調べる。そして、板幅方向に直線状に多点放電してV曲げ加工を行い、コンデンサーの充電電圧や静電容量、放電点間隔が曲げ角に与える影響について調べる。

2. 単発放電による曲げ加工実験

2.1 実験方法

図1に箔材のスパークフォーミングに用いた実験装置の概略を示す。試験片には幅1mm、厚さ0.05mmのステンレス(SUS304)の箔材を用い、試験片を固定したNC-XYテーブルを制御して、試験片を加工位置、曲げ角の測定位置に移動する。リレースイッチの可動部に取付けた電極棒をリレースイッチのON/OFFによる動作を利用して、

試験片に接近、放電を発生させて加工を行う。試験片の2点の変位をレーザー変位計で測定して傾きを求め、加工前後の傾きの変化から試験片の曲げ角を計算する。また、加工後に試験片表面に見られる放電痕を光学顕微鏡で観察する。

図2に充放電回路の概略を示す。リレースイッチを充電回路に接続して静電容量 $C=1-100\mu\text{F}$ のコンデンサーを最大電圧 $V=70\text{V}$ の直流電源により充電する。充電が完了後に、リレースイッチを放電回路に切り替え、試験片と電極棒を接触させることにより放電を発生させ、曲げ加工を行う。電極棒には $\phi 0.5\text{mm}$ のグラファイト棒を用い、電極棒には一極、試験片は+極に接続する。

2.2 実験結果

加工後の試験片表面に残った放電痕の表面と断面の光学顕微鏡写真を図3に示す。図3(a)はコンデンサーの充

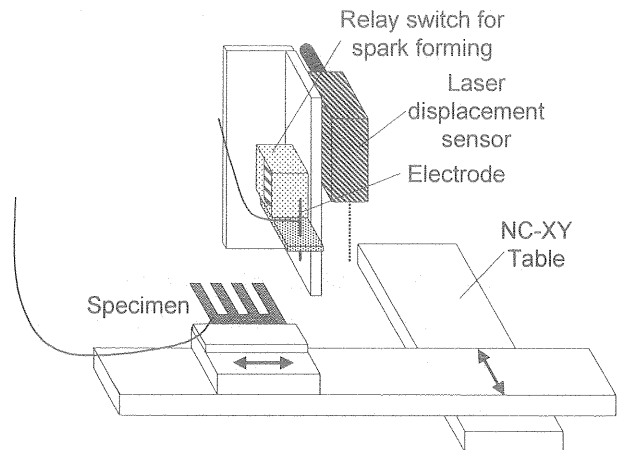


図1 スパークフォーミングの実験装置

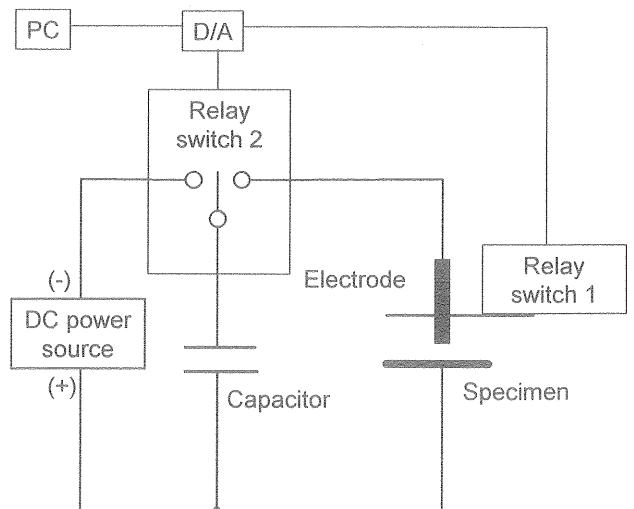


図2 スパークフォーミングの充放電回路

電圧が $V=40V$ 、静電容量が $C=20\mu F$ のときの放電痕である。放電痕の直径は $\phi 0.10-0.15mm$ でグラファイト電極の直径($\phi 0.5mm$)よりも小さくなっている。図3 (b)はコンデンサの充電電圧が $V=50V$ 、静電容量が $C=10\mu F$ のときの放電痕の断面である。放電が発生した部分に熔融、除去された材料が再凝固したクレーターが見られたが、熔融部分周辺には熱影響による結晶組織の変化は見られなかった。

放電痕の直径と曲げ角の関係を図4に示す。放電エネルギーを増加させると放電痕直径、曲げ角はともに大きくなり、曲げ角は放電痕直径の約2乗に比例する。

3. スパークフォーミングのFEMシミュレーション

3.1 シミュレーション方法

スパークフォーミングにおける加工現象を理解するため、熱伝導有限要素法と弾塑性有限要素法を合わせたシミュレーションを行う。弾塑性解析には静的陽解法を用い、温度計算と変形計算は交互に行う。各計算ステップにおいて、まず熱伝導有限要素法で素材の温度分布を計算して各要素の熱膨張量を求め、その熱膨張量を熱ひずみデータとして次の弾塑性有限要素法解析に入力して素材の変形を計算する。

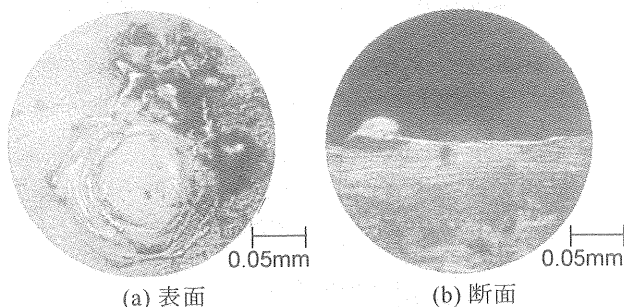


図3 放電痕の光学顕微鏡写真

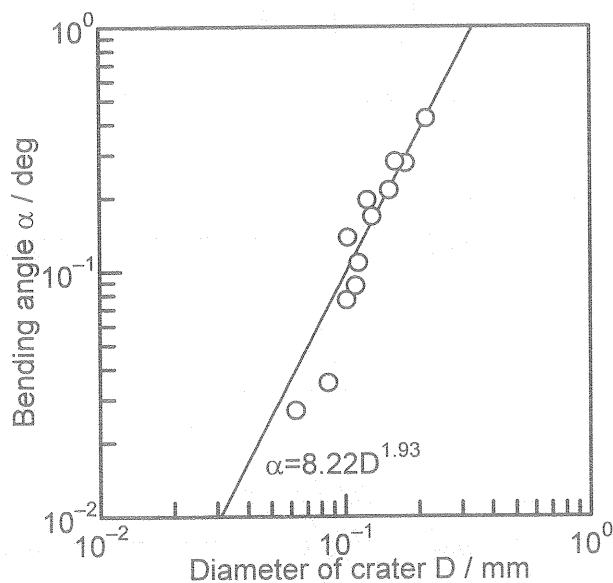


図4 放電痕直径と曲げ角の関係

シミュレーションでは半径 $0.5mm$ 、厚さ $0.05mm$ の円盤状の板材の中心に放電する場合を計算する。図5に示すような軸対称の計算モデルを用い、半径 $0.05mm$ の領域が放電により均一に被加工材の融点まで加熱されるとする。節点数232、要素数190とし、素材にはSUS304の常温での物性値を用い、簡単のため温度依存性は考慮しない。また、大気温度、素材の初期温度は $20^{\circ}C$ とし、材料表面から大気に熱伝達して素材は冷却される。実験では放電時間が $1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-4}s$ であったため、計算においては加熱時間を $3.0 \times 10^{-5}s$ とする。計算条件を表1に示す。

3.2 シミュレーション結果

図6に曲げ角の時間変化を示す。放電により試験片が加熱されるにしたがって、試験片の上部が膨張して曲げ角は負(上に凸)になるように変形しており、この間に上部の塑性変形が進行している。加熱終了直後($t=3.0 \times 10^{-5}s$)から自然冷却し始めると、曲げ角は大きくなっていき、 $t=3.0 \times 10^{-4}s$ で最大となった後に再び減少して変形が終了する。

試験片の温度分布を図7に示す。加熱直後(図7(a))で曲げ角が負で最小になっているときは、板厚方向、半径方向ともに等温線間隔が狭い。自然冷却中の曲げ角が最大になったとき(図7(b))は板厚方向の等温線間隔は比較的広くなり、板の上面と下面の温度差は $100^{\circ}C$ 未満と小さくなっている。図7(c)の変形終了後は板厚方向の温度分

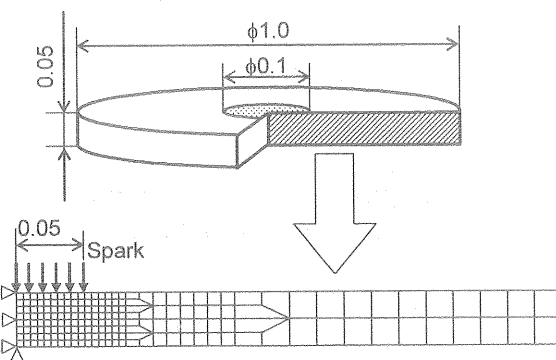


図5 FEMモデル

表1 スパークフォーミングの計算条件³⁾⁻⁵⁾

初期温度 / $^{\circ}C$	20
室温 / $^{\circ}C$	20
加熱温度 / $^{\circ}C$	1430
加熱時間 /s	3.0×10^{-5}
加熱部半径 /mm	0.05
熱伝達率 / $W \cdot mm^{-2} \cdot K^{-1}$	1.0×10^{-5}
熱伝導率 / $W \cdot mm^{-1} \cdot K^{-1}$	1.5×10^{-2}
比熱 / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	5.02×10^2
熱膨張率 / K^{-1}	1.73×10^{-5}
密度 / $kg \cdot mm^{-3}$	8.03×10^6
ヤング率 /GPa	197
ポアソン比	0.336
降伏応力 /MPa	210
$H=d \bar{\sigma} / d \bar{\epsilon}^p$ /MPa	2000
時間増分 /s	1.0×10^{-6}

布はほぼ均一となっている。

加熱直後、自然冷却中、変形終了後における試験片の応力分布をそれぞれ図8-10に示す。加熱直後(図8)では上面の加熱部で半径方向(σ_r)、円周方向(σ_θ)に大きな圧縮応力が生じているが、下部の引張り応力は小さい。しかし自然冷却して曲げ角が最大となる時(図9)には、上部に

大きな引張り応力が生じ、下部では逆に大きな圧縮応力が作用している。十分冷却し、変形が終了したとき(図10)には半径方向、円周方向ともに引張り応力状態となっている。また、いずれの時間においても上面の加熱部とその外側では円周方向の応力 σ_θ の符号が逆になっている。

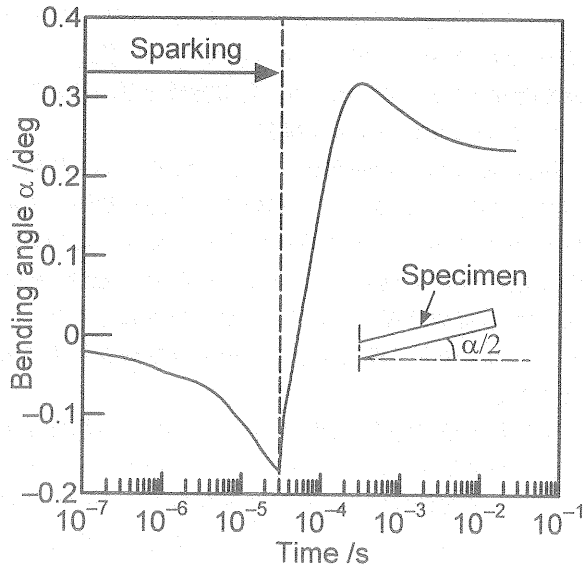


図6 曲げ角度の時間変化の計算結果

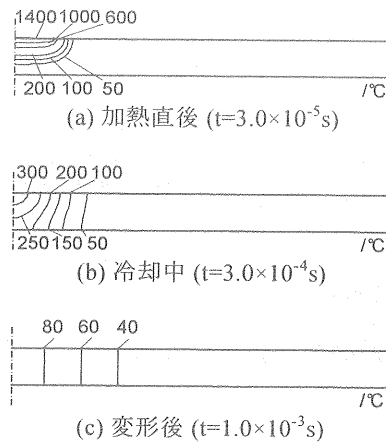


図7 温度分布の計算結果

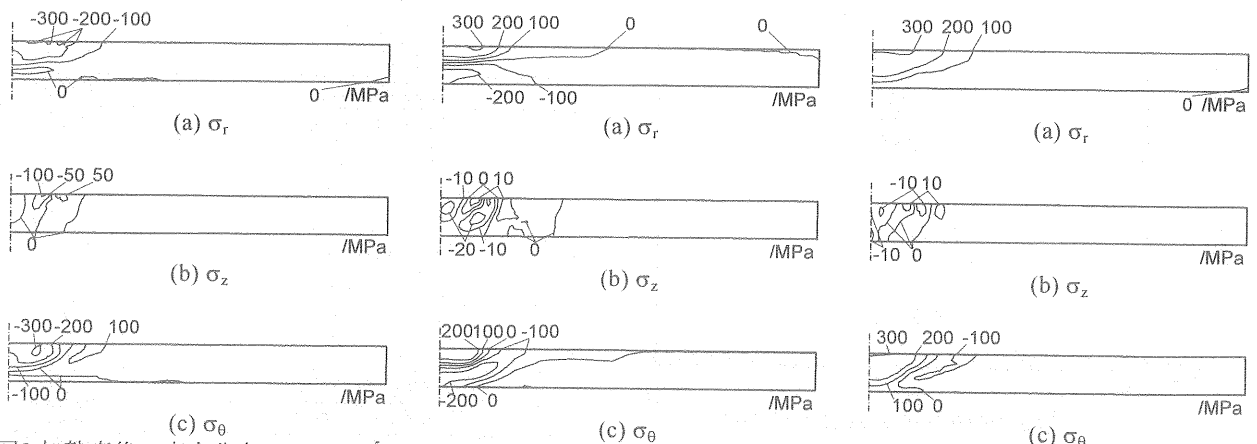


図8 加熱直後の応力分布 ($t=3.0 \times 10^{-5}$ s)

図9 冷却中の応力分布 ($t=3.0 \times 10^{-4}$ s)

図10 変形後の応力分布 ($t=1.0 \times 10^{-3}$ s)

4. V曲げ加工

4.1 実験方法

スパークフォーミングによるV曲げ加工には、図1、図2に示した実験装置、放電回路を使用し、試験片は図11に示すような厚さ0.05mmのSUS304の板材を板幅1.0mmのくし状に切削したものを用いる。図12に示すように板幅方向の直線状に間隔Pで、放電点数 $N=1/P$ の放電を発生させることによりV曲げ加工を行う。

4.2 充電電圧

静電容量を一定で充電電圧を変えたときの曲げ角を調べた結果を図13に示す。放電点間隔は $P=0.1$ mm、放電点数は $N=10$ である。充電電圧が増加すると曲げ角も直線的に増加した。充電電圧が増加しコンデンサーの静電エネルギーが大きくなると、試験片に投入されるエネルギーも増加するために曲げ角が大きくなると考えられる。

4.3 静電容量

充電電圧を一定に保ち、静電容量を変化させたときの曲げ角の変化を調べた結果を図14に示す。静電容量が大

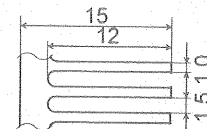


図11 V曲げ加工の試験片寸法

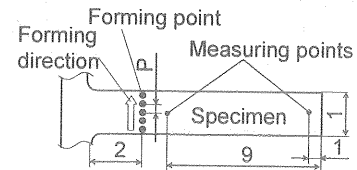


図12 放電および形状測定的位置

きくなると曲げ角も大きくなった。充電電圧と同様に静電容量が増加すると投入エネルギーも大きくなるためであると考えられる。

4. 4 放電点間隔

板幅が一定のとき放電点間隔により放電点数が変化する。放電点間隔が曲げ角に及ぼす影響を調べた結果を図15に示す。放電点間隔が大きくなると曲げ角はほぼ反比例して小さくなった。

次に曲げ角を放電点数で割った放電点1個あたりの曲げ角と放電点間隔の関係を図16に示す。放電点1個あたりの曲げ角は放電点間隔が大きくなるにつれて増加し、放電点間隔が約0.1mm以上ではほぼ一定値になった。放電痕の直径が約0.1mmであるため、放電点間隔が0.1mm以下では放電場所が重なって変形効率が悪くなると考えられる。

4. 5 単発放電による投入エネルギー一定時の曲げ角
一回の放電により投入される静電エネルギー E_s は充電電圧 V と静電容量 C を用いて $E_s=CV^2/2$ と表される。この静電エネルギー E_s を一定にして、充電電圧 V と静電容量 C を変化させたときの曲げ角を調べた結果を図17に示す。充電電圧が大きく静電容量が小さくなると曲げ角も大きくなった。これは充電電圧が大きいときはピーク放電電流が増加し、静電容量が小さいときは放電時間が減少するため、ともに一定の静電エネルギーが短時間に試験片表面に投入されるために、板上面と下面の温度差が大きくなって曲げ角が大きくなるからであると考えられる。

4. 6 全エネルギー一定時の曲げ角

加工中に投入される静電エネルギーの総和 E_t を一定に保ち、全エネルギーを多数の放電点に分割して投入する場合と、少数の放電点に集中して投入する場合は曲げ

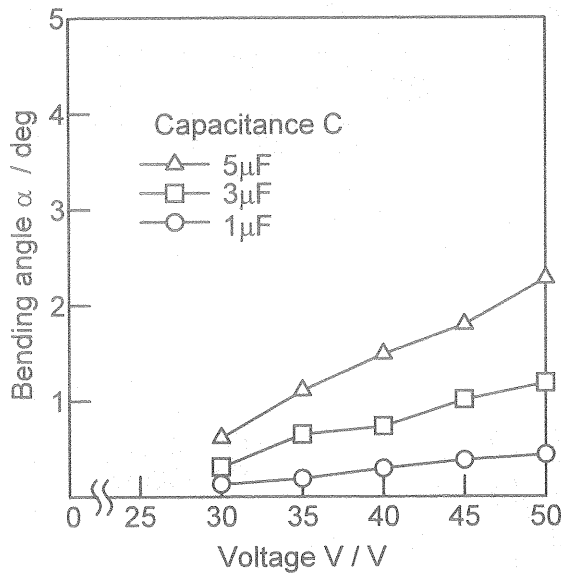


図13 充電電圧と曲げ角の関係(P=0.1mm, N=10)

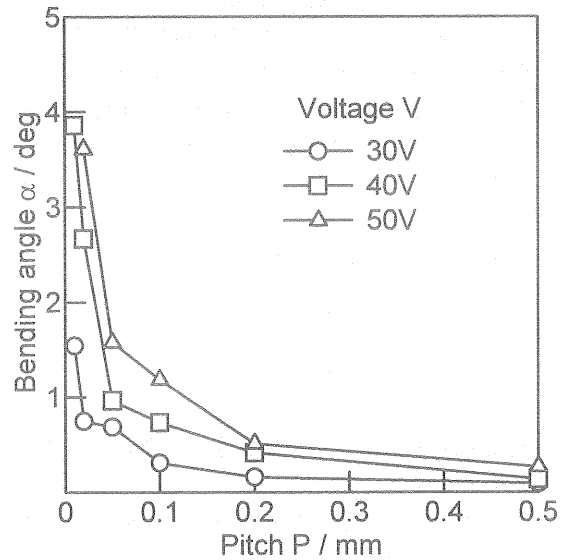


図15 放電点間隔と曲げ角の関係(C=3μF)

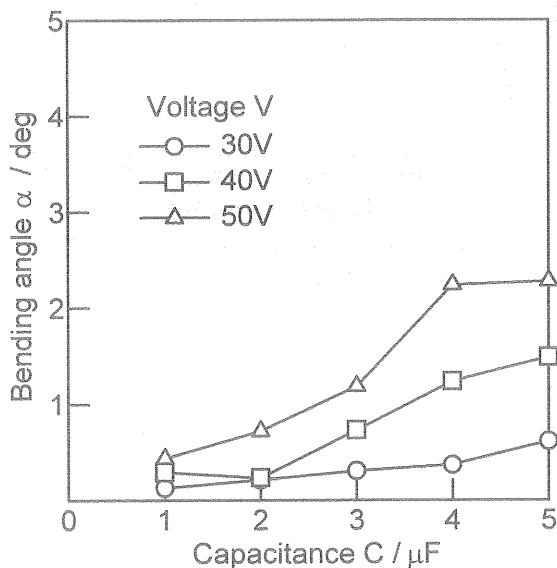


図14 静電容量と曲げ角の関係(P=0.1mm, N=10)

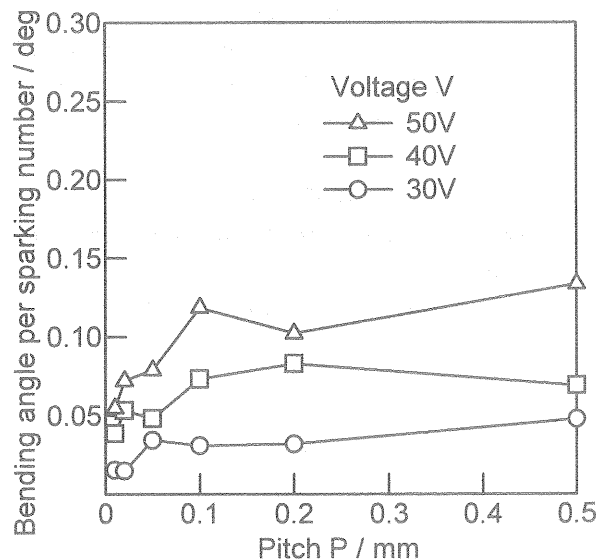


図16 放電点間隔と放電点1個あたりの曲げ角の関係(C=3μF)

角が異なることが考えられる。全エネルギーは一回の放電による投入エネルギー E_s と放電点数 N を用いて $E_t = E_s N$ 、また充電電圧 V と静電容量 C により $E_s = CV^2/2$ であるので $E_t = CV^2 N/2$ と表される。全エネルギー E_t が一定の条件で静電容量 C と放電点数 N を変化させたときの曲げ角を調べた。充電電圧 V は50Vで一定である。

実験結果を図18に示す。全エネルギーが $E_t = 25\text{mJ}$ のときの曲げ角はほぼ一定値になったが50mJと100mJのときは放電点数が5-10回のときに曲げ角が最大となった。全エネルギーが一定であるにもかかわらず放電点数により曲げ角は異なり、エネルギー効率が最大となる放電点数が存在する。これは放電点数が少ないと全体を大きく曲げることができず、放電点数が増加すると放電点間隔が小さくなり、図16で得られたように加工効率が減少するからと考えられる。

5. おわりに

スパークフォーミングにおける放電痕の大きさと曲げ角の関係を実験により求め、測定した放電痕の大きさ、放電時間を用いて熱伝導有限要素解析と弾塑性有限要素解析を交互に行い、加工中の板材の変形挙動や温度分布、応力分布を求めた。またスパークフォーミングによる V 曲げ加工を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) 充電電圧と静電容量が大きくなると曲げ角は大きくなる。
- 2) 放電点間隔の増加に伴い曲げ角は減少するが放電点1個あたりの曲げ角は増加する。
- 3) 一回の放電による投入エネルギーが一定の条件下では充電電圧が大きく、静電容量が小さいときに曲げ角が大きくなる。
- 4) 加工に要する全エネルギーが一定の条件下ではエネルギー効率が最大となる放電点数が存在する。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、天田金属加工機械技術振興財団の平成13年度奨励研究助成を受けたことを付記し、同財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Namba, Y. : Proc. Int. Conf. Lasers '85, (1986), 403-407.
- 2) Otsu, M., Wada, T. & Osakada, K. : CIRP Ann., 50-1

(2001), 141-144.

- 3) 日本機械学会: 機械工学便覧, (1991), B4-7, 丸善.
- 4) 長谷川正義: ステンレス鋼便覧, (1976), 124, 日刊工業新聞社.
- 5) Boyer, H.E. : Atlas of Stress-Strain Curves, (1987), 291, ASM Int..

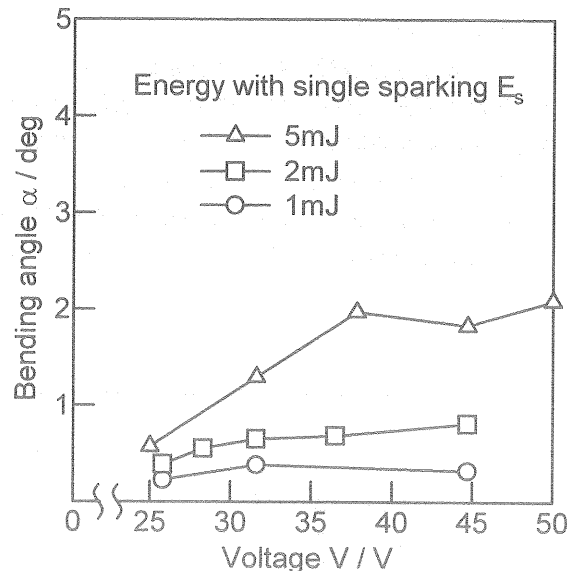


図17 1放電あたりの放電エネルギーが一定時における充電電圧と曲げ角の関係 ($P=0.1\text{mm}$, $N=10$)

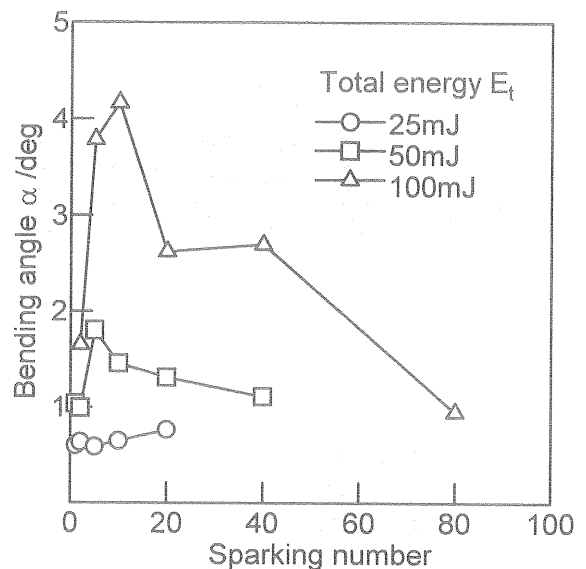


図18 全放電エネルギーが一定時の放電点数と曲げ角の関係 ($V=50\text{V}$)