

# スパークフォーミングによる薄板のマイクロ曲げ加工

大阪大学大学院基礎工学研究科・システム人間系機械科学  
(現 熊本大学 工学部 知能生産システム工学科)

講師 大津 雅亮

(平成13年度奨励研究助成 AF-2001025)

キーワード：スパークフォーミング，マイクロV曲げ加工，有限要素法シミュレーション

## 1. 緒言

近年、機械部品や電気部品の小型化が進むにつれて部品形状の高精度化の要求が高まっている。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<sup>1)</sup>。レーザーフォーミングはレーザー照射による板厚方向の温度勾配により生じる熱応力を利用しているために非接触加工、スプリングバックがない等の利点がある。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。

レーザーフォーミングよりも安価で熱応力を用いた加工法としてスパークフォーミングが提案されている<sup>2)</sup>。スパークフォーミング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温度勾配を生じさせて、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 $0.01^\circ$ 以下の微小角度の曲げ加工が可能である。板幅が加熱領域と比較して大きい場合には単発放電による加工では十分な変形が得られないため、放電位置を移動させながら多点放電を行う必要があるが、多点放電による加工や加工現象に関する詳細はまだ報告されていない。

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

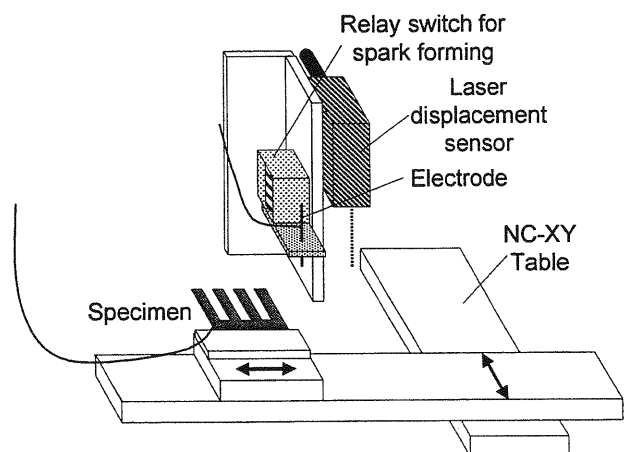


図1 スパークフォーミングの実験装置

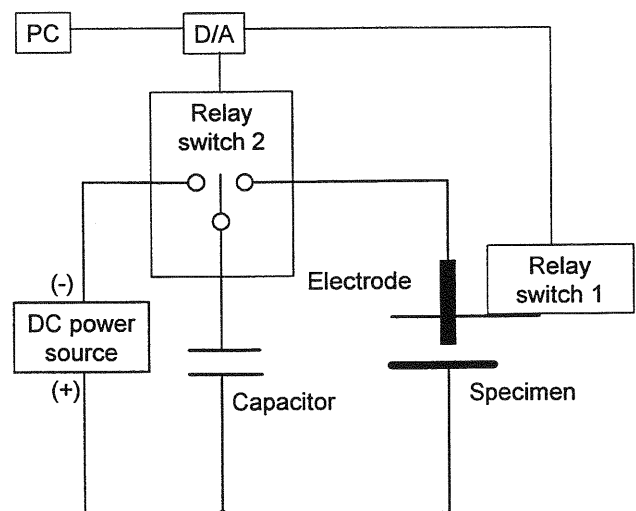


図2 スパークフォーミングの充放電回路

最大電圧 $V=70V$ 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 $\phi 0.5mm$ のグラファイト棒を用い、電極棒には負極、試験片は正極に接続する。

## 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電電圧が $V=40V$ 、静電容量が $C=20\mu F$ のときの放電痕である。 $\phi 0.5mm$ のグラファイト電極を用いているが、放電痕の直径は $\phi 0.10-0.15mm$ と小さくなっている。図3 (b)はコンデンサーの充電電圧が $V=50V$ 、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クレーターが生じており、表面には放電により熔融、除去された材料が再凝固して生じたと考えられる盛り上がり部が存在する。母材には圧延された結晶粒が観察されたが、熔融層直下に熱影響組織は確認できなかった。

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

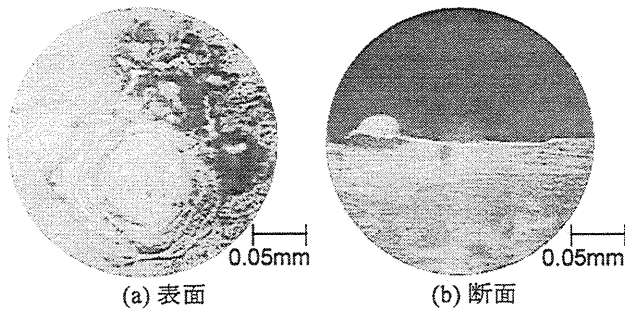


図3 放電痕の光学顕微鏡写真

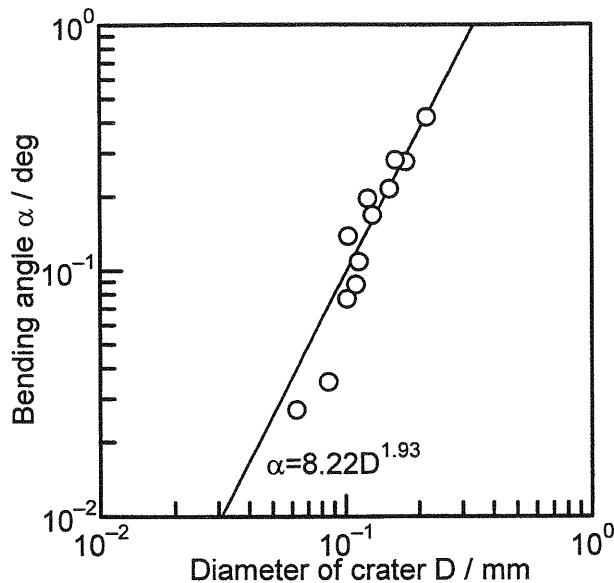


図4 放電痕直径と曲げ角の関係

## 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組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る。弾塑性有限要素法では、求めた熱膨張量を熱ひずみとして用いて素材の変形を計算する。

シミュレーションには半径 $0.5mm$ 、厚さ $0.05mm$ の円盤状の板材の中心に放電が生じる場合を取扱い、図5に示すような軸対称の計算モデルを用いる。前章の単発放電による実験結果では、曲げ角が広い範囲に渡って得られたにもかかわらず、放電痕直径が約 $\phi 0.1mm$ であったため、シミュレーションにおいては半径 $0.05mm$ 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

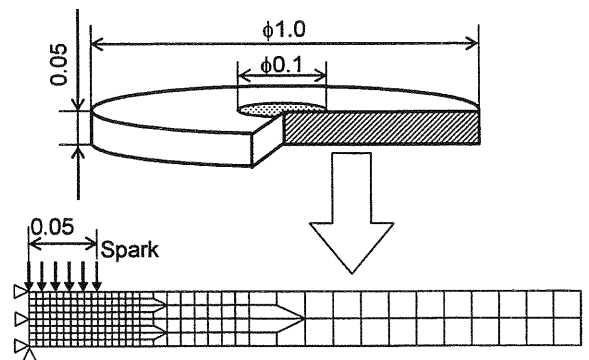


図5 FEMモデル

表1 スパークフォーミングの計算条件<sup>3)-5)</sup>

初期温度 / $^{\circ}C$	20
室温 / $^{\circ}C$	20
加熱温度 / $^{\circ}C$	1430
加熱時間 /s	$3.0 \times 10^{-5}$
加熱部半径 /mm	0.05
熱伝達率 / $W \cdot mm^{-2} \cdot K^{-1}$	$1.0 \times 10^{-5}$
熱伝導率 / $W \cdot mm^{-1} \cdot K^{-1}$	$1.5 \times 10^{-2}$
比熱 / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	$5.02 \times 10^2$
熱膨張率 / $K^{-1}$	$1.73 \times 10^{-3}$
密度 / $kg \cdot mm^{-3}$	$8.03 \times 10^6$
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	$1.0 \times 10^{-6}$

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、 $t=1.7 \times 10^{-4}$ sで最大となった後に再び減少して変形が終了する。

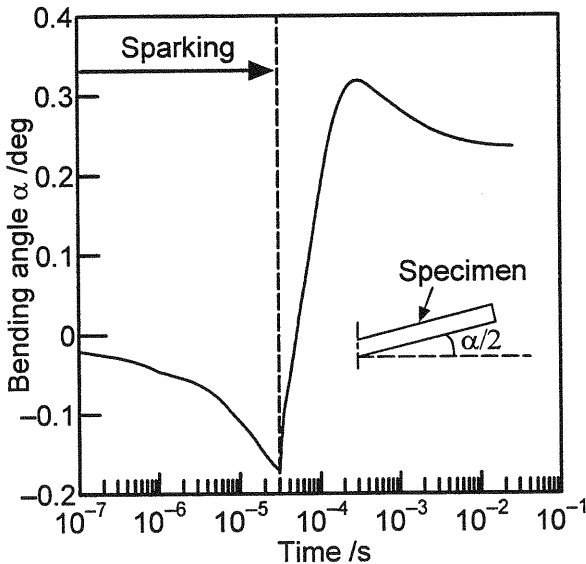


図6 曲げ角度の時間変化の計算結果

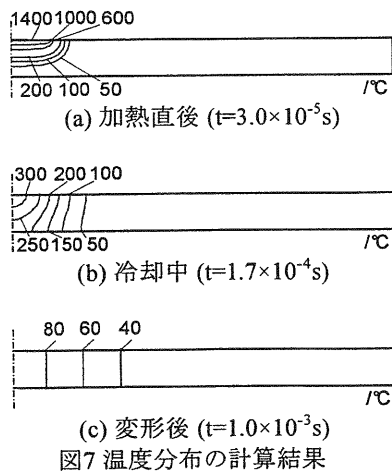


図7 温度分布の計算結果

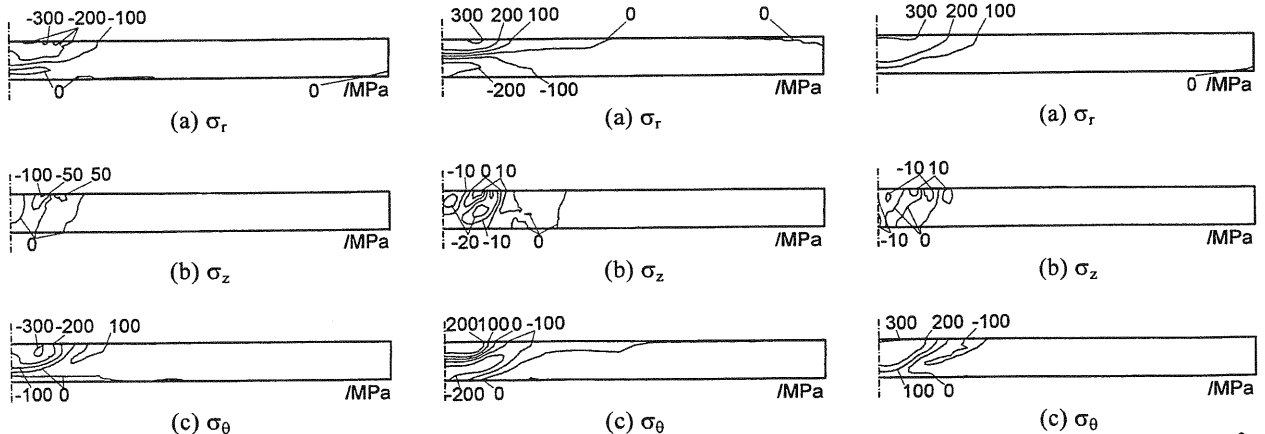


図8 加熱直後の応力分布 ( $t=3.0 \times 10^{-5}$ s)

図9 冷却中の応力分布 ( $t=1.7 \times 10^{-4}$ s)

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

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、半径方向ともに急峻な温度勾配が生じている。自然冷却中の曲げ角が最大になったとき(図7(b))は板厚方向の温度勾配は $100^\circ\text{C}$ 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、円周方向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 $\sigma_\theta$ の符号が逆になっている。

#### 4. V曲げ加工

##### 4.1 実験方法

実験装置、放電回路は図1、図2に示したのを使用し、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。

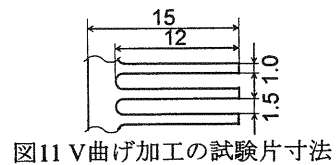


図11 V曲げ加工の試験片寸法

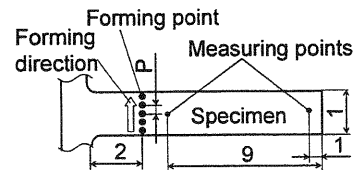


図12 放電および形状測定的位置

#### 4. 2 充電電圧

静電容量を一定に保ち充電電圧に対する曲げ角の変化を調べた結果を図13に示す。放電点間隔は $P=0.1\text{mm}$ 、放電点数は $N=10$ である。充電電圧が増加すると曲げ角も線形に増加した。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分数回数的に小さくなった。

次に曲げ角を放電点数で除した放電点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 $0.1\text{mm}$ 以上ではほぼ一定値になった。各々の放電点が曲げ角増加に影響を及ぼしているが、放電点間隔が密なときには影響が小さ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

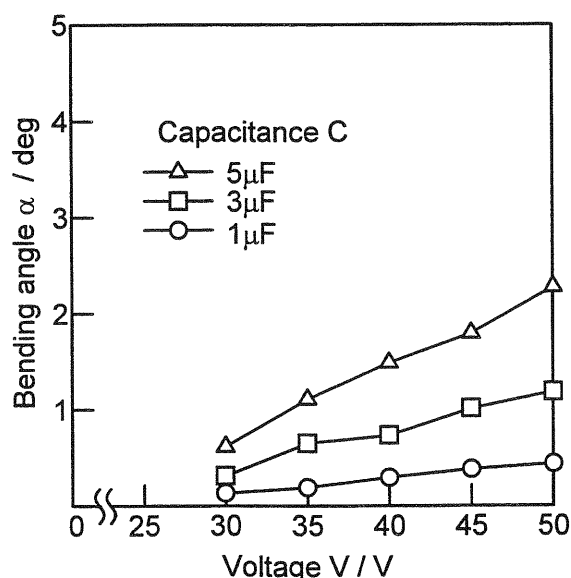


図13 充電電圧と曲げ角の関係( $P=0.1\text{mm}$ ,  $N=10$ )

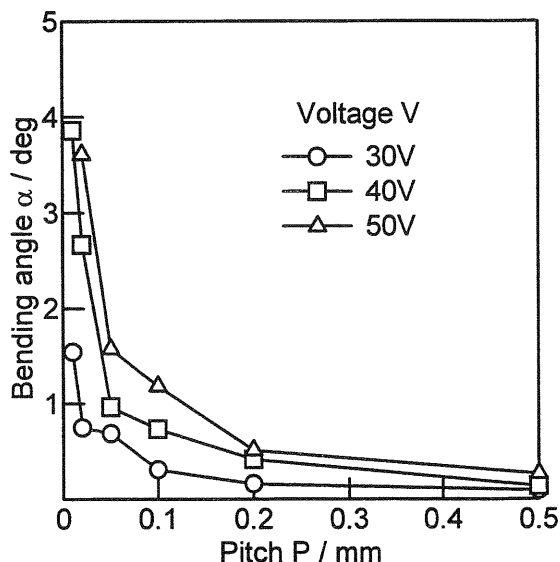


図15 放電点間隔と曲げ角の関係( $C=3\mu\text{F}$ )

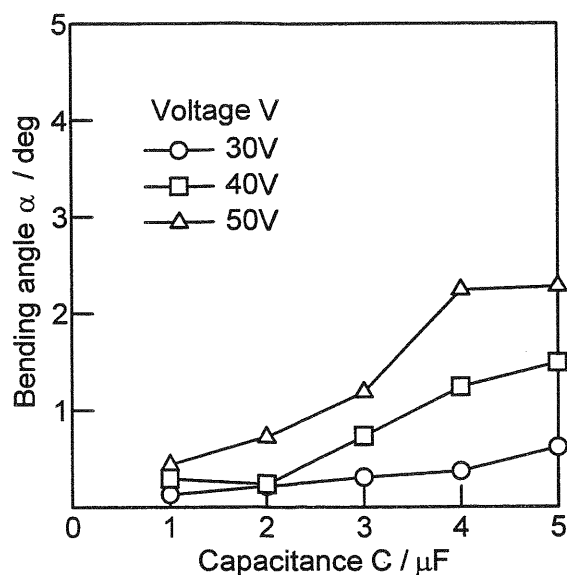


図14 静電容量と曲げ角の関係( $P=0.1\text{mm}$ ,  $N=10$ )

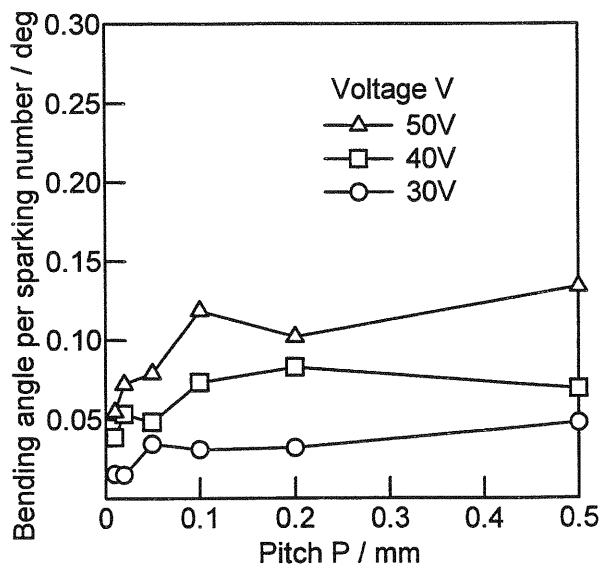


図16 放電点間隔と放電点1個あたりの曲げ角の関係( $C=3\mu\text{F}$ )

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、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、箔材内部に急峻な温度勾配が生じ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、少数の放電点に分割して投入する場合は曲げ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。

#### 5. 結言

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。

#### 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..

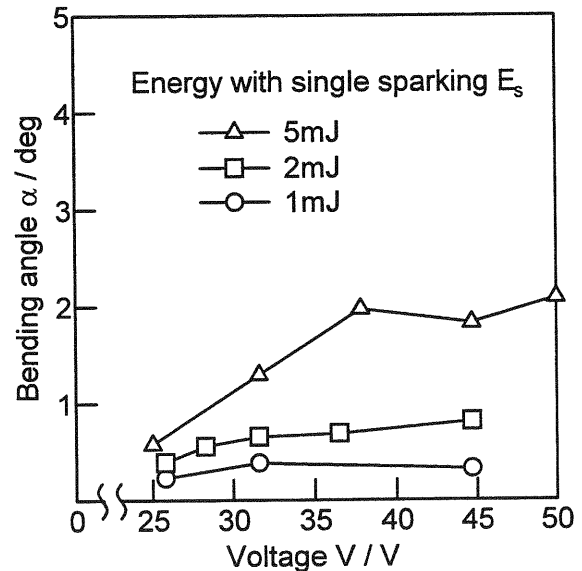


図17 放電あたりの放電エネルギーが一定時における充電電圧と曲げ角の関係 ( $P=0.1\text{mm}$ ,  $N=10$ )

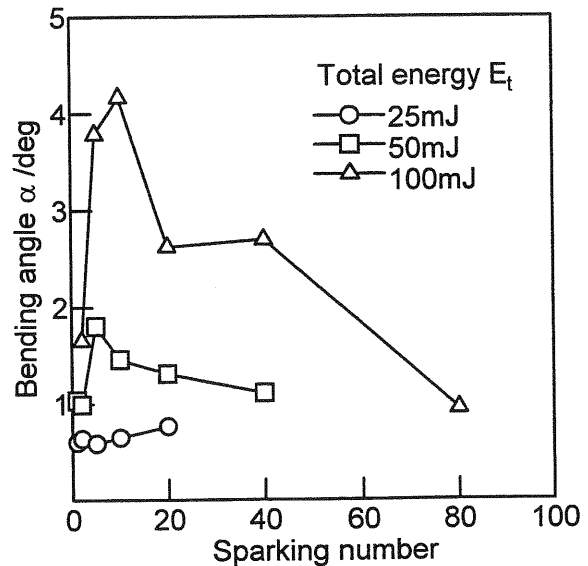


図18 全放電エネルギーが一定時の放電点数と曲げ角の関係 ( $V=50\text{V}$ )