

氏 名	小 原 治 樹
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 1 年 7 月 7 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 ( 博士課程 ) 精密工学専攻
学 位 論 文 題 目	液中放電成形に関する基礎的研究
指 導 教 官	東北大学教授 戸部 俊美
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 戸部 俊美 東北大学教授 竹山 寿夫 東北大学教授 麻生 忠雄 東北大学教授 永井 伸樹 東北大学助教授 加藤 正名

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

液中放電成形法は高速塑性加工法の一つであり、コンデンサに蓄えた電気的エネルギーを水などの液体中の電極間で瞬間的に放出し、このとき液体中に生ずる衝撃的圧力を用いて板を成形する加工法である。

最近エネルギー変換効率が高いため、液中の加工電極間に金属細線を張り渡し、これを放電電流により気化、爆発させて圧力を発生させる細線爆発法が用いられているが、この成形法は放電から成形にいたる現象が複雑で、成形に影響する因子も多いため、その成形の機構は充分明らかにされておらず、このため実際の成形条件の設定は試行錯誤的にならざるを得ない現状である。

したがって本成形法で有効な成形を行なうためには放電から成形にいたる機構を系統的に把握

し、成形に重要な諸因子の影響を明らかにする必要がある。

本研究にはこの観点から放電時の加工電極間の電流波形、電圧波形、および水中に発生する圧力波を測定して、これに及ぼす充電条件、放電回路条件、細線条件について実験的に検討し、圧力波を受けた円板の張出し変形過程を観察して圧力波と円板の張出し量の関係を求め、さらに円板の張出し変形過程を理論的に解析してその変形機構を求めたものである。

## 第2章 液中放電成形法の概要と本研究で用いた液中放電成形装置、および実験の諸条件

実験に用いた放電回路のインダクタンスは  $7.5 \mu\text{H}$ 。コンデンサ容量は  $1.25 \mu\text{F}$  から  $4.0 \mu\text{F}$  の範囲で変えた。

水槽はおもに開放型を用いたが場合に依りて密閉型も用いた。水槽中の液体は水を用いた。

加工電極間の細線は銅を用い、電極間に真直に張り渡してその断面積、長さを変えて実験を行なった。

成形には厚さ  $1 \text{ mm}$ 、直径  $160 \text{ mm}$ 、張出し部直径  $100 \text{ mm}$  の焼鈍したアルミニウム板を用い、周辺を固定して張出させた。

## 第3章 水中の細線爆発による加工電極間消費エネルギー

本章では加工電極間の消費エネルギー波形を放電電流波形、加工電極間電圧波形から求め、これにおよぼす充電電圧  $V_0$ 、コンデンサ容量  $C_0$ 、細線断面積  $S_w$ 、長さ  $l_w$  の影響を調べた。

放電電流は放電路のまわりに設置したログスキコイルと RC 積分回路を用いて測定し、加工電極間の電圧は抵抗分圧して電流とともにオシロスコープで測定した。

実験は充電エネルギーがほぼ  $0.65$ 、 $1.3$ 、 $2.6 \text{ kJ}$  をとるように  $C_0$ 、 $V_0$  を組み合わせ、細線の  $S_w$ 、 $l_w$  を変えて行なった。

測定した電流、電圧波形の例を図 3.1 に示す。波形は  $S_w$ 、 $l_w$  の値によって異なる。

加工電極間の消費エネルギー  $W(t)$

$$W(t) = \int_0^t V(t) I(t) dt \quad (3.1)$$

は図 3.2 のように変化し、一般に最初の急激なエネルギー消費領域とそれに続く緩やかなエネルギー消費領域が見られた。

第一の領域のエネルギー消費量を第一段階消費消費エネルギー  $W_I$  とし、 $W_I$  と充電エネルギーの比を放電効率  $\eta_I$  とすると、 $\eta_I$  は次式の  $S_w^*$ 、 $l_w^*$  において最大値  $80 \sim 90\%$  に達することが明らかとなった。

$$S_w^* = 2.1 \times 10^{-3} (C_0 V_0)^{1.30} f_0^{\frac{1}{1.54}} \quad (\text{mm}^2) \quad (3.2)$$

$$I_w^* = 4.3 \cdot V_0 f_0^{-\frac{2}{3}} \quad (\text{mm}) \quad (3.3)$$

また全実験条件下の $\eta_I$ と $S_w$ ,  $I_w$ の関係は図3.3のようにまとめることができ, ここにおいて水中の銅線の爆発に関し,  $\eta_I$ と $C_0$ ,  $V_0$ ,  $f_0$ ,  $S_w$ ,  $I_w$ の関係が明らかとなった。

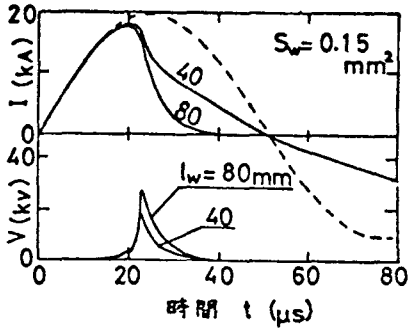


図 3.1 電流, 電圧波形例

( $C_0 = 40 \mu\text{F}$ ,  $V_0 = 8.4 \text{ kV}$ )

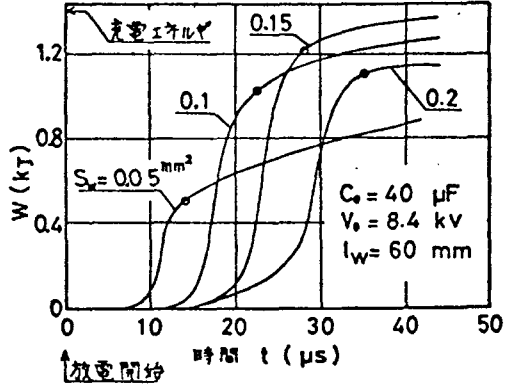


図 3.2  $W(t)$ の変化

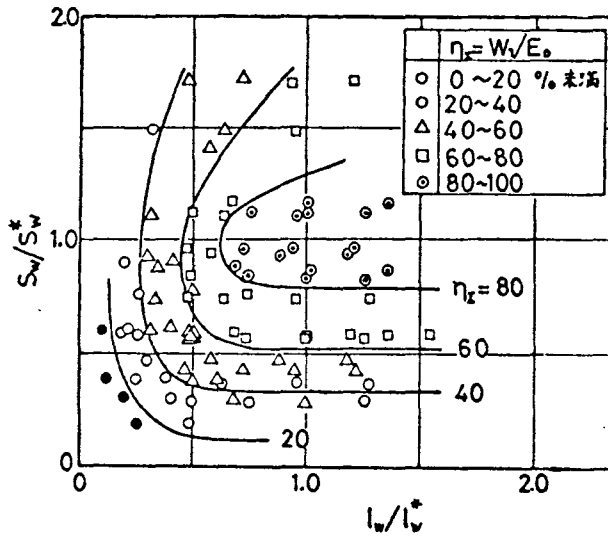


図 3.3  $S_w$ ,  $I_w$ と $\eta_I$ の関係

#### 第 4 章 水中の細線爆発により生ずる圧力波

本章では水中の細線爆発により生ずる圧力波を測定して, 圧力波と加工電極間消費エネルギーの関係を求めた。

圧力波は弾性棒の端面で受け、棒中を伝播する弾性波を半導体ひずみゲージで測定することにより求めた。

波形はいずれも持続時間数十  $\mu\text{s}$  程度の指数減衰に近い波形であった。

次式で定義した圧力波の時間積分値  $F_t$  (以下、力積と呼ぶ)

$$F_t = \int_0^{\infty} p(t) dt \quad (4.1)$$

および圧力波のピーク値  $P_m$  は、水中の伝播距離  $L_D$  と加工電極の長さ  $I_w$  の比に従って減衰することが実験により明らかとなった。

また  $L_D = I_w$  における圧力波のピーク値  $\hat{P}_m$ 、力積  $\hat{F}_t$  が第一段階消費エネルギー  $W_I$  と  $I_w$  の値によってはば定まることが明らかとなった。

$F_t$  と  $W_I$ 、 $I_w$  の関係は次式が得られた。

$$\hat{F}_t = 2.1 \times 10^{-2} W_I^{0.34} I_w^{-0.16} \quad (4.2)$$

( $W_I$  (kJ),  $I_w$  (cm),  $\hat{F}_t$  ( $\text{kg} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ))

## 第5章 金属板の動的変形過程の実験とその解析

本章では圧力波を受けた円板の張出し変形過程を観察し、圧力波と円板の張出し量の関係を求めた。

円板の張出し変形過程は高速度カメラを用いてその張出しの斜め方向から撮影し、観察した。

観察の結果、円板は中央が幾分凹んだ円錐台形となって張出し、その変形に要する時間は 0.8 ms 程度であった。

圧力波の持続時間に比べ、変形に要する時間がその 20 倍以上も大きいことを考慮し、円板がその変形の初期に圧力波の衝撃による運動エネルギーを得て張出すとし、また材料の応力ひずみ関係として次の  $n$  乗硬化則

$$\sigma = \sigma_0^* \epsilon^n \quad (5.1)$$

を適用して、円板の最終張出し高さ  $W_{cf}$  と圧力波の力積  $F_t$  の間の次の関係式を得た。

$$\frac{W_{cf}}{R_0} = \left[ \exp \left( \frac{n+1}{2} \frac{F_t^2}{\rho_0 \sigma_0^* h_0^2} \right)^{\frac{1}{n+1}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

$R_0$ : 円板の張出部半径                       $h_0$ : 円板の初期板厚

$\rho_0$ : 円板材料の密度

式 (5.2) と本実験結果はほぼ一致し、これにより水中の圧力波と円板の張出し量の関係が得られた。

以上、第3章から第5章にかけて、放電から成形にいたる現象と、因子、 $C_0$ 、 $V_0$ 、 $f_0$ 、 $S_w$ 、 $I_w$ 、 $L_D$ 、 $\rho_0$ 、 $h_0$ 、 $R_0$ 、 $\sigma_0^*$ 、 $n$  の影響が概略明らかとなった。

## 第6章 衝撃圧力による円板張出しの動的変形過程の理論的解析

本章では図6.1に示す衝撃の圧力を受けた周辺固定円板の軸対称張出し変形過程を、材料のひずみ速度依存性を考慮した応力ひずみ関係を用いて解析し、板に加わる圧力条件材料のひずみ速度依存性の影響などについて検討した。

解析では板の曲げ剛性を無視し、変形中、板は平面応力状態にあり、Prandtl-Reussの応力ひずみ関係に従うとした。

解析は運動方程式を差分表示して板素片の半径方向、垂直方向の加速度を求め、これを時間について積分して時刻々々の変位等を求める方法を用いた。

解析の結果、円板は図6.2に示すように円錐台形状となって変形が進行することが明らかとなった。

また圧力波形を三角波で近似し、その立ち上がり時間、持続時間、ピーク値を変えて解析した円板の変形に要する時間にくらべ、圧力の作用時間がその1/3以下であれば、円板の最終張出

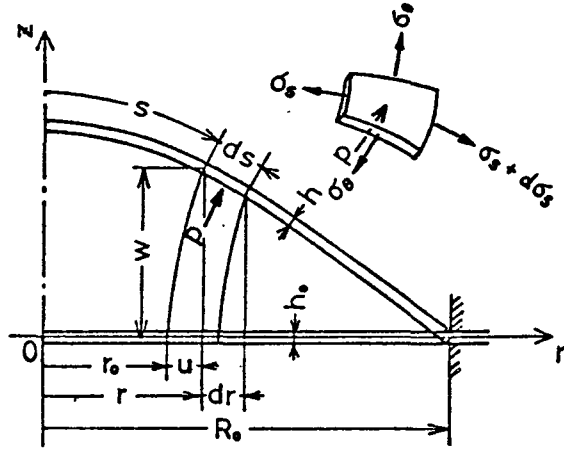


図6.1 解析のモデル

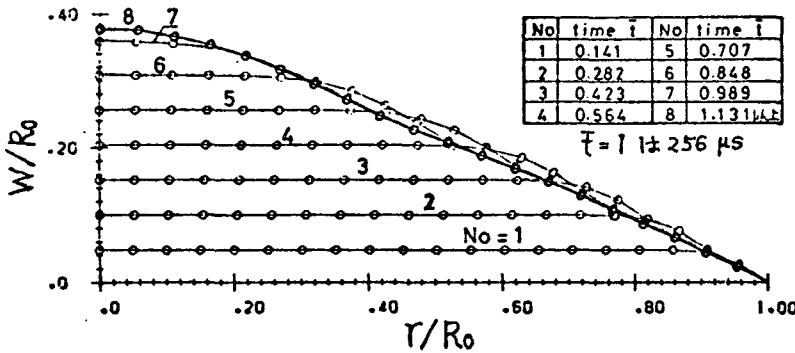


図6.2 解析結果の一例(円板の形状変化)

し高さは圧力波の力積のみによって図6.3のように定まることが明らかとなった。

図6.3の解析結果は実験結果とほぼ一致した。

また図6.3に示したように、円板材料のひずみ速度依存性を無視すると、円板の最終張出し高さは考慮した場合よりも15%程度大きな値となることが明らかとなった。

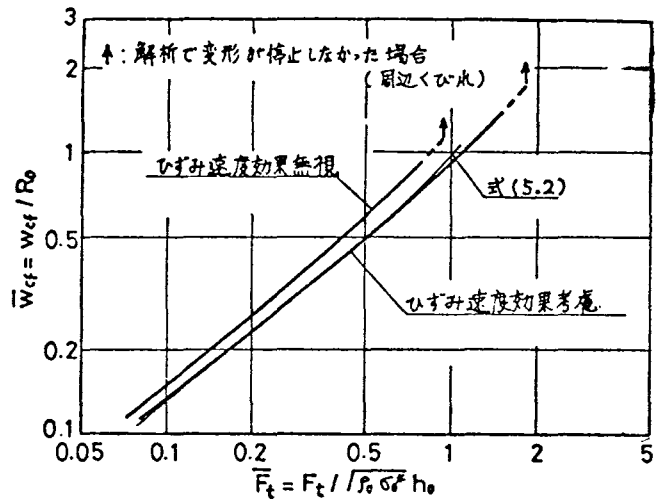


図 6.3 力積と最終張出し高さの関係

## 第 7 章

本研究では水中の銅線の爆発を用いた液中放電成形法について、諸因子の影響を放電から成形にいたる各段階にわたって明らかにし、また圧力波を受けた円板の張出し変形過程を解析してその機構を明らかにした。

したがって以上の結果から、本成形の放電から成形にいたる過程の概要と、成形に重要と考えられる諸因子の影響が明確となった。

## 審 査 結 果 の 要 旨

液体中に設置された放電電極間に金属細線を結び、高電圧でコンデンサにたくわえた静電エネルギーを瞬間的に放出させると、金属細線は瞬間的に蒸発し急激に膨張するので、液体中に高圧が発生する。この圧力を利用する成形法は、細線爆発液中放電成形と呼ばれ、スプリングバックが小さいことなどから、最近特に注目されている。著者は液中放電成形機を試作し、開放型水槽を用い細線条件と発生圧力との関係について克明に実験するとともに、金属円板張出し成形の基礎的研究を行った。この種の研究はこれまでほとんど行われていない。本論文は全編7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章は試作した実験装置、放電回路の概要と、水槽内における電極の設定について述べたものである。

第3章は細線条件と加工電極消費エネルギーとの関係を明らかにするために行った実験の結果をまとめたものである。充電電圧と回路条件に対し加工電極消費エネルギーを最大とするように銅細線の長さや断面積を定め、この細線条件のもとでは充電エネルギーの80%以上を電極間で消費できることを明らかにし、放電条件について重要な知見を得ている。

第4章は水中に発生した圧力波の測定法と、放電条件を変えた場合の測定結果について述べたもので、圧力波の波高値および圧力の時間積分値は加工電極消費エネルギーから推定できることを示している。

第5章はアルミニウム焼なまし円板の張出し実験結果をまとめたもので、高速度カメラによる測定から、成形途中の形状はほぼ円すい台状をなすことを確かめ、また試片円板の張出高さや圧力の時間積分値との関係を明らかにしている。

第6章は圧力波をうける円板の動的張出し過程を、膜理論を基礎とし、ひずみ速度依存性を考慮した応力-ひずみ関係式を用い、ひずみ増分理論により解析した結果をまとめたものである。すなわち、圧力波の実測値を負荷として円板の張出し過程を解析し、張出高さは実験値とはほぼ一致することを示し、また張出高さや圧力の時間積分値との関係を導き、先に実験により得た結果を理論的に解明した。これらは高速塑性変形の解析に新たな知見を加えたものである。

以上要するに、本論文は開放型成形水槽を用いた細線爆発液中放電成形について、細線条件、加工電極消費エネルギー、発生圧力の時間積分値およびアルミニウム円板の張出高さの相互関係を実験的に解明し、ついで円板の動的張出し過程を塑性力学的に解析して実験と比較検討し、液中放電成形の基礎的事項について新たな知見を加えたもので、精密工学ならびに精密工業に貢献するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。