

氏 名	さ の とし お 佐 野 利 男
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和50年3月25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	液中放電成形機による高速塑性加工に関する基礎的 研究
指 導 教 官	東北大学教授 竹山 寿夫
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 竹山 寿夫 東北大学教授 辛島 誠一 東北大学教授 戸部 俊美 東北大学教授 植川 武男

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒 論

液中放電成形機を用いて成形を行う際に発生する現象は極めて複雑であり，研究分野も多岐にわたっている。本研究は液中放電成形機を用いて金属薄板の高速加工を行う際に発生する未解決の種々の問題を取り上げ，理論的，実験的に考察し，液中放電成形機による薄板の加工技術の確立を目的とした。

第2章では従来ほとんどなされていない密閉型放電槽中に発生する圧力の計測を行い，板の変形との関係を明らかにした。

第3章では液中放電成形法で金属薄板の自由張出し加工を行うとき，張出した円板の中央に生ずる傷の発生原因を実験的に明らかにし，その影響を調べ，対策を検討した。

第4章では衝撃的な負荷を受ける周辺固定の円形膜の運動を解析した。

第5章では歪速度の履歴によって生ずる内部構造の差を電子顕微鏡によって観察した。

第2章 密閉型放電槽中に発生する圧力と板の変形

実験に使用した成形機の回路定数は抵抗 $25.7\text{ m}\Omega$ ，インダクタンス $1.0\text{ }\mu\text{H}$ ，静電容量 $50\text{ }\mu\text{F}$ であった。充電電圧の使用範囲は $0\sim 30\text{ kV}$ である。

圧力の計測には半導体圧力変換器を使用した。変換器の固有振動により圧力波形が正確に読み取れないため Low-Pass-Filter を通した波形を観測した。持続時間 0.5 m sec の方形波入力の場合 Filter を通した出力波形の立ち上がり時間は $9.23\text{ }\mu\text{sec}$ ，歪率は 2.8% であった。成形した板の材質は銅，アルミニウム，アルミ合金 (52S)，鉛等である。

成形エネルギーの制御が比較的容易であることが液中放電成形法の特徴の一つである。成形エネルギーは充電電圧で制御することが多い。そこで、充電電圧と発生する圧力の波高値の関係を調べた。

図1に示すように、波高値は充電電圧の増加とともに単調に増加せず、極小値が存在した。極小値の発生は種々の実験的考察から圧力の発生機構に起因しているものと考えられる。

放電によって Gap-Wire，および、その周囲の液体が気化することによって気泡が生じ、それが液体を押し回すことによって圧力が発生すると考えられている。したがって、充電電圧を上げるとともに波高値 P_{max} を支配するも

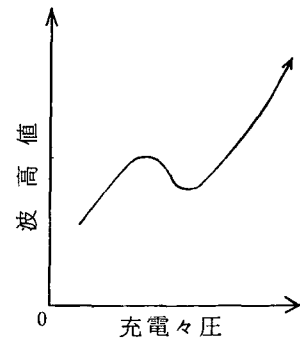


図1 充電電圧と圧力波高値

のは水蒸気から金属蒸気に移っていくものと考えられる。 P_{max} に極小値が生ずる充電電圧で放電したとき Gap-Wire の温度上昇を Gap 間に放出されるエネルギーから見積ると、Wire を部分的に気化する程度まで温度が上昇しているものと推定される。このことは放電後の Gap-Wire の形状からも確認できた。

放電によって Gap-Wire が部分的に気化し、金属蒸気の気泡群が存在する液体中でパーンアウトが起るため圧力波面が吸収され、圧力の上昇が妨げられること、さらに、Wire が液相から気相へ相転位するため気泡生成の速度が鈍ることなどが極小値の生ずる原因と考えられる。上に説明した極小値の位置は Wire の材質重量によって異なる。

充電電圧と円板の張出し高さの関係にも P_{max} の極小値に対応する位置に極小値が生ずることが確かめられた。

開放型放電槽では放電時に Gap-Wire の近くに発生した気泡が再膨張し、それに伴って板の変形がさらに進められることが明らかにされている。

本実験結果から、密閉型放電槽では圧力のパルス列が発生することが明らかになった。これは気泡の振動によって発生するものと考えられる。放電槽の容積を小さくすると気泡は振動しなくなることを利用してモデル実験を行い、2次以後の波高値も薄板の成形に影響していることを明らかにした。さらに、気泡の振動にともなう生ずる繰り返し荷重が円板に作用すると、円板の歪分布が均一となり、成形限界が上がることも証明できた。

その他、この章ではつぎに述べることを明らかにした。

- (i) 圧力波形中に含まれている周波数成分についてスペクトル解析を行った結果、密閉槽中に発生する圧力波のスペクトル密度は放電槽固有の寸法の影響を強く受けるものである。
- (ii) 自由張出し加工で張出し高さを制御する場合は、同一の放電条件で繰り返し放電し、成形することが有効である。この方法は成形限界を上げる効果もある。

第3章 キャビテーションによる金属表面の壊食

液中放電成形機を用いて金属薄板の張出し加工を行うと、張出した円板の中央部に図2に示すような傷が生ずる。この傷はキャビテーションの壊食作用によって生ずるものであることを実験的に明らかにした。

放電によって生ずる衝撃圧が円板に達すると、円板の運動によって円板の近くの液体は張力を受けることをレーザーと半導体圧力変換器を用いて確認した。水道水中に微小気泡等のキャビテーションの核となるべき要素が存在することにより、水は容易に破壊し、空洞が生ずる。空洞が消滅するときマイクロジェットを形成し、水撃作用により金属板の表面を損傷させるものと考えられることができる。

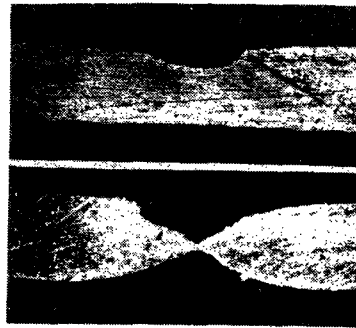


図2 発生した傷の断面

アメゴムを円板に密着させて成形することにより傷の発生は完全に防ぐことができる。この方法は板厚の均一化を目的とするプラグクッション技術の一方法としても有効である。

第4章 衝撃負荷を受ける円形膜の運動の解析

この章では周辺固定の円形膜が膜の全面に一様に分布する圧力を受けた場合の膜の運動を解析した。

膜の微小要素の水平方向の運動方程式は

$$\rho h r \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = Pr \frac{\partial w}{\partial S} + \frac{\partial}{\partial S} \left(\sigma_1 h r \frac{\partial r}{\partial S} \right) - \sigma_2 h \quad (1)$$

垂直方向の運動方程式は

$$\rho h r \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -Pr \frac{\partial r}{\partial S} + \frac{\partial}{\partial S} \left(\sigma_1 h r \frac{\partial w}{\partial S} \right) \quad (2)$$

となる。上式において r , w はそれぞれ水平, 垂直方向の座標成分, ρ は密度, h は板厚, P は考えている時刻に円板に作用している圧力, σ_1 , σ_2 はそれぞれ半径方向, 円周方向の応力を表わす。次式を用いて方程式を無次元化する。

$$\left. \begin{aligned} \eta &= r/R, & \omega &= w/R, & \xi &= h/h_0, & \eta_0 &= r_0/R \\ \tau &= \left\{ P_0 / (R h_0 \rho_0) \right\}^{\frac{1}{2}} t, & \phi &= S/R, & \rho_0 &= P_0 R / h_0, & p &= PR / h_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式で () は変形前の状態, P_0 は最大圧力を表わす。質量保存則より次式が成り立つ

$$\eta \cdot \xi \cdot \rho \cdot d\phi - \eta_0 \cdot \rho_0 \cdot d\eta_0 = 0 \quad (4)$$

半径, 円周, 板厚方向の歪をそれぞれ次式で定義する。

$$e_1 = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} - 1, \quad e_2 = \eta / \eta_0 - 1, \quad e_3 = \xi - 1 \quad (5)$$

ただし $u_1 = \frac{\partial \eta}{\partial \eta_0}$, $u_2 = \frac{\partial \omega}{\partial \eta_0}$ とする。

着目している粒子の歴史を知るために(3)~(5)式を用いて Lagrange 座標を用いた運動方程式に書き変える。さらに, (1), (2)式と等価な1階の連立偏微分方程式を導き, 4本の特性曲線とそれに沿う微分関係式を得た。

特性曲線

$$d\eta_0 / d\tau = \pm \sqrt{F} = \pm C_1 \quad (6)$$

に沿う関係式として

$$\begin{aligned} \pm C_1 (dD_3 - u_1 d\eta_0) - dD_4 + u_3 d\eta_0 - \frac{u_1}{1+e_1} \left\{ \pm C_1 (dD_1 - e_1 d\eta_0) \right. \\ \left. - dD_2 + V t d\eta_0 \right\} - \frac{u_2}{(1+e_1) p_0} \left\{ \xi \sigma_2 u_2 - (1+e_1) p \eta \right\} d\tau = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \pm C_1 (dD_5 - u_2 d\eta_0) - dD_6 + u_3 d\eta_0 - \frac{u_2}{1+e_1} \left\{ \pm C_1 \cdot (dD_1 - e_1 d\eta_0) \right. \\ \left. - dD_2 + V t d\eta_0 \right\} + \frac{u_1}{1+e_1} \left\{ \xi \sigma_2 u_2 - (1+e_1) p \eta \right\} d\tau = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。特性曲線

$$d\eta_0/d\tau = \pm \sqrt{F + (1+e_1)F_1} = \pm C_2 \quad (9)$$

に沿う関係式として

$$\pm C_2 (dD_1 - e_1 d\eta_0) - dD_2 + Vt d\eta_0 - \left\{ \xi \frac{\sigma_2}{p_0} u_1 + (1+e_1)(1+e_2 - u_1) F - (1+e_1) F \right\} d\tau = 0 \quad (10)$$

を得る。(6)式は横波、(9)式は縦波を表わすことが飛躍条件からわかる。上式において $F = \frac{\xi \sigma_1}{p_0} \cdot \frac{1+e_2}{1+e_1}$, $F_1 = \frac{\partial F}{\partial e_1}$ とする。また $u_3 = \frac{\partial \eta}{\partial \tau}$, $u_4 = \frac{\partial \omega}{\partial \tau}$, $D_1 = e_1 \cdot \eta_0$, $D_2 = Vt \cdot \eta_0$, $D_3 = u_1 \cdot \eta_0$, $D_4 = u_3 \cdot \eta_0$, $D_5 = u_2 \cdot \eta_0$, $D_6 = u_4 \cdot \eta_0$ であり、 Vt は接線方向の速度成分を表わす。

応力と歪はHenckyの式によって関係づけられ、Misesの塑性条件によって塑性変形が進むものとする。材料は等方性であり n 乗硬化則に従うものとする。

(6)~(10)式を用いてMassau法により数値積分を行い、つぎに述べる結果を得た。

- (i) 円板の高速張出し加工を行うと円板の中央部の歪が極端に大きくなるが解析的な計算も同様な結果を示している。
- (ii) 試料中を伝わる縦波の伝播速度は横波の伝播速度より大きい。縦波の伝播速度は変形の進行とともに減少し、横波の伝播速度は変形が進むと増加する。
- (iii) 一樣な初速度をもつ円板を考察したHudson等の解析結果では円板の中央部は平面を保ったまま運動する。本解析結果もそれに類似している。

第5章 高速変形を受けたアルミニウムの電子顕微鏡による観察

高速度で変形する材料の変形抵抗は準静的変形より高いことが一般的である。これは歪速度と歪速度の履歴による内部構造の差に起因するものであることが指摘された。そこで、本章では電子顕微鏡によって、歪速度の履歴によって生じた内部構造の相違を観察した。

材料試験の方法としては液圧バルジ試験、高速バルジ試験を行った。この方法は張出していく円板の中央部が等2軸引張りとなり、力学的には単軸圧縮と等価であることを利用するものである。

実験に使用した材料は工業用純アルミニウムであり、歪速度の検出にはレーザーを使用した。また、薄膜試料は電解研磨法で作製した。

電子顕微鏡による直接観察からつぎの結果を得た。

- (i) 歪が小さい範囲 ($\bar{\epsilon} < 0.1$) では転位密度の差以外に明確な相違は認められなかった。 ρ_d ,

ρ_s をそれぞれ動的，準静的変形を受けた試料中の転位密度とすると，歪速度が $30 \sim 200 \text{ sec}^{-1}$ の範囲では

$$(\rho_d - \rho_s) / \rho_s = \text{const}$$

となる。

- (ii) 歪の大きい範囲 ($\bar{\epsilon} > 0.1$) ではセル構造の発達が著しい。セル径は高速変形を受けた試料中のものが小さい。セル径は歪の増加とともに減少し，ある歪以上では一定となる。
- (iii) 微小転位ループは歪が小さい範囲では差がないが，歪の大きい範囲では高速変形を受けた試料中にその数は極めて多い。
- (iv) 高速度で強加工された試料中ではポリゴニゼーションが起きていること，さらに微小転位ループの数が多いことから変形によって試料の温度が上昇するものと考えられる。そこで塑性仕事から巨視的な温度上昇を，拡散方程式から微視的な温度上昇を推定し，電子顕微鏡内での加熱実験，加熱によるピッカース硬度の変化などからその妥当性を証明した。

第 6 章 結 論

第 1 ～ 5 章の内容をまとめて述べた。

審査結果の要旨

高エネルギー高速度加工は、従来の加工法では成形困難な材料、もしくは複雑な形状をもつ部品の冷間加工に適し、かつ少数個の生産にも好都合な塑性加工で最近急速に実用され始めた。数種類の方法があるが、著者は試作された密閉槽型の液中放電成形機を用いて板金加工の基礎的研究を行った。これまでにこの種の研究は殆ど行われていない。論文は6章より成る。

第1章は諸論で高エネルギー高速度加工に関する従来の研究と本研究の内容の概説である。

第2章は試作放電槽による加工について基本的実験を行った結果を述べたもので、5節に分かれる。第1節は緒言である。第2節には圧力の測定法が述べてある。半導体圧力変換器と試作した low pass filter を用い、固定底の密閉槽の場合について測定した圧力波形の検討を行い、圧力測定法として採用しうることを示した。第3節には、充電エネルギーの増加に伴い槽内に発生する圧力に極小値を生ずることを認め、種々条件を変更して実験を繰返し、その原因は放電に用いる細線の蒸気化の時期と周囲の水の気化の時期との相互関係に帰着されることを述べている。また圧力の最高値とアルミニウムの試片円板の張出高さの関係を求めた。第4節では、圧力波形のスペクトル解析を行い、放電槽の形がスペクトル分布に大きな影響を与えることを示した。

第5節は電極付近に生ずる気泡の振動に関する記述である。気泡は加工終了までに数回の膨張収縮を繰返し、圧力波を送る。放電槽の底が固定壁、被加工板の場合について圧力波の周期と減衰を測定した。被加工板の場合には、その初期波高値は勿論のこと、2次以降の減衰値も板の変形に多少影響を及ぼすことを示した。浅い槽では気泡の振動は生じない。これを利用して単一成形の繰返しにより得られる張出高さの各段階におけるひずみ分布を測定した。ひずみ分布は単一放電に比して一様化する。また自由張出加工における張出高さの制御法を提案している。

第3章では被加工板に生ずる壊食について述べている。本加工法では円板の中央に小さい壊食を生ずること、これは加工中板の背後の液中にキャビテーションが生じ崩壊することによって生ずることを実験的につきとめ、その防止法を示した。

第4章は高速張出しにおける円板の解析で膜理論の仮定のもとに全歪理論を用いて、特性曲線法により、直線上昇圧力の負荷に対して数値的に解析を行った。半径に沿うひずみ分布等について実験結果の特徴を定性的に説明することができた。

第5章には本加工法により成形したアルミニウム板の透過電子顕微鏡観察結果が述べられている。平均歪速度が0から578 1/sec の加工を行い、円板中央部に生ずる内部組織を観察し、高速加工の場合にはセル壁が網状となっていること、微小転位ループの数が多いことを明らかに

した。またその原因は加工中局所が高温になるためであると考え、その可能性を試算し、さらに試料の回復現象のおくれの観察結果から上記の考え方の正しいことを述べている。このようにして、静的・動的応力-歪曲線の相異、歪速度の履歴の影響について透過顕微鏡の面から新しい知見を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は密閉槽による液中放電成形機による板金加工の、加工中に生ずる問題を解決して加工法としての基本を確立すると共に解析による考察をも実現し、さらには試料の透過電子顕微鏡による観察を行って塑性曲線に対するひずみ速度、その履歴の影響について金属組織上から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所が少なくない。

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。