液中放電成形に関する基礎的研究 (第 3 報)*

奥島 啓武** 人見 勝人** 井上 友一*** 大森 正巳****

Fundamentals of Hydrospace Forming (III)

Keiji OKUSHIMA, Katsundo HITOMI, Tomoichi INOUE, Masami OMORI

The mechanism of pressure generation in hydrospace was theoretically analyzed, assuming the polytropic relationship between the pressure generated by hydrospace and the travel distance of the ball in a specially designed shooting type hydrospace device. It appears that the pressure was produced by hydrospace owing to the expansion of high pressure vapor generated between electrodes.

In the authors' experiments, the expansion ratio was about 300 and the polytropic index for the vapor generated between electrodes was 1.24 for the electrode distance of 3.85mm and the discharge energy of 4000 Joules.

The composition of gas generated between electrodes in hydrospace was 99:1 to 9:1 for liquid vapor vs. metal vapor of electrodes.

The strain rate of metal deformation by hydrospace forming was theoretically analyzed, though not in detail.

1. ま え が き

液中火花放電にともない発生する機械的出力は第2報¹⁾で述べたように、投てき形出力測定で、たまの重量と投てき距離(射程)から簡単に求まる。放電成形に関して、(a)加えた衝撃力、(b)加工物の変形および変形速度、(c)それらの相互関係、を探究していく上において、まず放電溝に発生する圧力推移とその伝達機構を知る必要がある。しかしながら液中火花放電にともない、放電溝に発生する最高圧は 10^8 Joule 程度の放電で 10^4 気圧のオーダーに達するものと推定され、かつ現象がきわめて短時間(5~20 μ sec)であるので、これを直接測定することは非常に困難である。筆者らは前記投てき形出力測定によりたまの受けた正味出力を測定し、これに理論的考察を加え発生した圧力推移を算定した。なお投てき形出力測定については第2報¹⁾を参照されたい。

液中火花放電にともない発生する機械的出力の源は、放電溝に発生する高圧ガスによると考えられ、これが放電液を媒体として外部に仕事をする。その伝達機構は現状では次の三つの形が考えられている。すなわち

- i) 衝撃的に発生した高圧ガスにより放電液中に衝撃波または圧力波を誘起し、この衝撃波または圧力波エネルギーが外部に仕事をする。

- ii) 衝撃的に発生した高圧ガスが膨張して外部に仕事をする。

- iii) 上の両者の合成エネルギーが仕事をする。
- 等である。いま筆者らは上記のいずれであるかについては限定を加えずに実験結果から理論的に考察を試みた。

2. 投てき形出力測定におけるたま込め深さの影響

この測定法の詳細は第2報で述べたが、図1(a)はその概要を示す。放電による正味出力は $\frac{1}{2}WL$ で与えられ、たまの重量 W と射程 L から求まるが、たま込め深さ S の出力に及ぼす影響を調べてみると、4000 Joule (10kV 80 μ F) の放電で、図1(b)に示す結果が得られた。なお、たまの重量 W は $W=1.4$ kg である。いま上向きに打出すときについて考える。

砲身中のたまの加速度を $\alpha'g$ (g : 重力加速度) で表わすと、たま底面の作用力 F は、圧縮方向の力を+にとると

$$F = m\alpha'g + mg = mg(\alpha' + 1) \quad m: \text{たま質量}$$

$$\alpha' + 1 = \alpha \quad \text{とおくと}$$

$$F = mg\alpha$$

(b)図に示す実験結果から、砲身中のたまの変位 S に対して α は図1(c)に示すような傾向に変化していると考えられる。

いまたま込め位置を基準位置より S_0 にとり (ただし S_0 は放電溝体積をたま断面積で除したもので式(6)参照)、砲口までの距離を S_x で表わすと、たまの初速度(砲口を出る時の速度) v_{0x} は次式で表わされる。

* 1964年4月精機学会関西支部講演会にて発表

** 正会員 京都大学工学部

*** 正会員 京都工芸繊維大学

(a)

(b) たまめ深さとたま飛行距離

(c) 砲身中におけるたまの変位—たまの加速度

図 1

S_0 = 放電溝体積/たま断面積

図 2 砲身中のたま変位と加速度係数 α の減衰

$$\frac{1}{2} m \frac{d(v^2)}{dt} = mg\alpha'$$

$$\int_0^{v_0^2} d(v^2) = 2g \int_{S_0}^{S_x} \alpha' dS = 2g \left(\int_{S_0}^{S_x} \alpha dS - \int_{S_0}^{S_x} dS \right)$$

したがって

$$v_0^2 = 2g \left(\int_{S_0}^{S_x} \alpha \cdot dS - S_x + S_0 \right)$$

同一放電で、たまめ深さを S_1, S_2, S_3 と変化させた場合の初速度を v_1, v_2, v_3 とすると、初速度はそれぞれ次のごとく表われ、図 2 はこの関係を示す (ただし図 2 は、たまをためた位置 O を基準にして砲口までの距離 (たまめ深さ) で表わした)。

$$v_1^2 = 2g \left(\int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - S_1 + S_0 \right)$$

$$v_2^2 = 2g \left(\int_{S_0}^{S_2} \alpha \cdot dS - S_2 + S_0 \right)$$

$$= 2g \left(\int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - S_1 + S_0 + \int_{S_1}^{S_2} \alpha dS - S_2 + S_0 + S_1 - S_0 \right) \quad (1)$$

$$= v_1^2 - 2g \left(\int_{S_2}^{S_1} \alpha \cdot dS - S_1 + S_2 \right)$$

$$v_3^2 = 2g \left(\int_{S_0}^{S_3} \alpha \cdot dS - S_3 + S_0 \right)$$

$$= v_1^2 - 2g \left\{ (S_3 - S_1) - \int_{S_1}^{S_3} \alpha dS \right\}$$

砲口を出る瞬間における α が $\alpha = 1$ ($\alpha' = 0$) になるようにたまめ深さ S_1 を選べば、初速度が最大になる。逆に液中火花放電の出力を投てき形出力測定装置で測定するときは、放電条件に対して最も正味出力が大きくなるようなたまめ深さを選ぶことが必要である。

3. たま底面の受ける圧力推移

たまめ深さが S_1 のときについて考えると、図 2 において、たまに与えた仕事 W_e は次式で表わされる。

$$F' = mg\alpha'$$

$$W_e = \int_{S_0}^{S_1} F' dS = mg \int_{S_0}^{S_1} \alpha' dS = W \left(\int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - S_1 + S_0 \right) \quad (2)$$

ただし F' : たま底面の作用力, $\alpha = \alpha' + 1$

W : たま重量 $= m \cdot g$

たまの放射角 (砲身の仰角) が 45° のとき、砲身中のたまの運動と初速度 v_1 との間に次式が成立する。

$$v_1^2 = 2g \int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - 2^{1/2} g S_1 + 2g^{1/2} S_0$$

また一方放体の放射距離 L に関しては

$$v_1^2 = g \cdot L \quad (\text{ただし放射角 } 45^\circ) \quad (3)$$

$$\therefore 2g \int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS = gL + 2^{1/2} g S_1 - 2^{1/2} g S_0 \equiv gL$$

(この実験の範囲では $L = 10\text{m}$, $S_1 = 4\text{cm}$)

したがって実際には上式で S_0 と S_1 の項は省略できる。

いま砲身中の加速度の減衰が次式で表わされるものと仮定をする。

$$\alpha S^n = C_1 \quad (\text{一定})$$

$$\text{すなわち } \alpha_0 S_0^n = \alpha S^n = \alpha_1 S_1^n = S_1^n (\alpha_1 = 1) \quad (4)$$

$$\therefore v_1^2 = 2g \int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - 2^{1/2} g S_1 + 2^{1/2} g S_0$$

$$= \frac{2g\alpha_0 S_0}{(n-1)} \left[1 - \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{n-1} \right] - 2^{1/2} g S_1 + 2^{1/2} g S_0 \quad (5)$$

ただし $\alpha_0 = \alpha_1 \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^n$

$$S_0 = \frac{\text{放電溝体積}}{\text{たま底面積}} = \frac{V_0}{A} \quad (6)$$

筆者らは $\alpha_1 = 1$ (すなわち放射距離最大) になるように S_1 を実験的に選ぶ。また、 S_0 に関する放電溝体積 V_0 は (Zingerman によれば)²⁾ 電極放電痕面積 $\times$ 電極間距離として求まる。 n が定まれば式(6)により α_0 は計算できる。

次に n の決定についてのべる。

砲身中の平均加速度を $\alpha_m' \cdot g$ とすれば、砲口をでるたまでの速度 v_1 は前述の $\alpha' + 1 = \alpha$ より $\alpha_m' + 1 = \alpha_m$ の関係が成立するから次式で表わされる。

$$v_1^2 = 2\alpha_m' \cdot g (S_1 - S_0) = 2\alpha_m \cdot g \cdot S_1 - 2^{1/2} g \cdot S_1 + 2^{1/2} g \cdot S_0 \quad (7)$$

(5), (7)より

$$\alpha_m = \frac{S_0}{S_1} \cdot \frac{\alpha_0}{(n-1)} \left[1 - \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{n-1} \right] \quad (8)$$

(3), (7)より

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha_m \cdot g \cdot S_1 &= g \cdot L + 2^{1/2} \cdot g \cdot S_1 - 2^{1/2} \cdot g \cdot S_0 \\ \alpha_m &= \frac{L}{2S_1} + 2^{1/2} - 2^{1/2} \frac{S_0}{S_1} \quad \text{あるいは} \quad \alpha_m' \cong \frac{L}{2S_1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

実験により、 S_1, L を測定すれば(9)式から α_m が計算できる。他方、式(6), (8)に関し、指数 n の各値について、あらかじめ $\alpha_m - n$ 線図を作製しておけば、式(9)より α_m が実験的に求まるので、この $\alpha_m - n$ 線図から指数 n が求まる。したがって式(4)の $\alpha_1 = 1$ から α の推移が計算できる。

加速度 $\alpha' \cdot g$ すなわち $(\alpha - 1)g$ を受けるたまでの底面に作用する絶対圧力 P は次の式で表わされる。

$$P = \frac{W}{A} (\alpha - 1) + 1 \quad (10)$$

次に S_0, S_x 点におけるたまでの底面の受けるゲージ圧力を $P_0', P_x' (\text{kg/cm}^2)$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} P_0' &= \frac{m}{A} (\alpha_0 - 1)g = \frac{m}{A} \alpha_0' g \\ P_x' &= \frac{m}{A} (\alpha_x - 1)g = \frac{m}{A} \alpha_x' g \end{aligned} \right\} \quad (10')$$

ただし、 A : たま底面積 (cm^2)、 m : たま質量 (kg)

以上から、砲身中のたまでの移動について、たま底面に働く圧力変化が求まる。

また P_m : たま底面に働く平均圧力 $\left(\frac{F_m}{A} \right)$ 絶対圧力

$$P_m' : \text{平均有効圧力} \left(P_m' = P_m - 1 = \frac{F_m}{A} - 1 \right)$$

ゲージ圧力

$V_x : S_x$ に対応する体積 ($A \cdot S_x$)

とすれば、 $F_m = m\alpha_m \cdot g$

$$P_m' = \frac{m}{A} \alpha_m' g \left(P' = \frac{m}{A} \alpha' g \right) \quad P_m = \frac{W}{A} (\alpha_m - 1) + 1 \quad (11)$$

(10), (10'), (11) 等の関係から、(8)を PV で表わすと

$$P_m' = \frac{W\alpha_m'}{A} = \frac{W}{A} (\alpha_m - 1) = \frac{W}{A} \alpha_m - \frac{W}{A}$$

$$= \frac{V_0}{V_1} \cdot \frac{P_0}{(n-1)} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^{n-1} \right] - \frac{W}{A} - 1 \quad (12)$$

$$P_0 V_0^n = P_x V_x^n = P_1 V_1^n = C_2 \quad (\text{一定}) \quad (13)$$

ただし P_0, P_x, P_1 は前述のゲージ圧力 P_0', P_x', P_1' を絶対圧力で表わしたものである。式(13)は自重の項を無視するとガス膨張の式となる。

(4), (10'), (13) より、 C_1, C_2 の関係を求めると

$$C_2 = mg A^{n-1} \left\{ C_1 - S^n \left(1 + \frac{A}{mg} \right) \right\} = V_1^n$$

($P_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$) である。

また (9), (11) より

$$P_m = P_m' + 1 = \frac{W L}{2A S_1} + 1 = \frac{W L}{2V_1} + 1 \quad (14)$$

ただし L : たまの射程 (放射角 45°)

$$V_1 = A \times S_1$$

ただし S_1 : 射程が最大になるたま込め深さ

P_m' は平均有効圧力で、(14)より実験的に求まる。したがって、前同様式(12)で $P_m - n$ の関係を求めておけば、同様に n を決定できる。

また、任意のたま位置 S'' におけるたまでの速度 v'' は

$$v'' = \left[2g \int_{S_0}^{S''} \alpha' \cdot dS \right]^{1/2} \quad (15)$$

その間の平均加速度 ($\alpha_m'' g$) は、立上りを無視すると

$$\alpha_m'' g = \frac{g}{(S'' - S_0)} \int_{S_0}^{S''} \alpha' dS \quad (16)$$

$S_0 \rightarrow S''$ に要する時間 T'' は

$$T'' = \frac{v''}{\alpha_m'' g} = 2^{1/2} (S'' - S_0) \left[g \int_{S_0}^{S''} \alpha' dS \right]^{-1/2} \quad (17)$$

等で求まるが、これらの式において、積分の項および S'' は次のごとくである。

$$\int_{S_0}^{S''} \alpha' dS = \int_{S_0}^{S_1} \alpha' dS - \int_{S''}^{S_1} \alpha' dS$$

$$= \int_{S_0}^{S_1} \alpha \cdot dS - \int_{S''}^{S_1} \alpha \cdot dS - (S'' - S_0)$$

$$\alpha' = \frac{A}{W} P' = \frac{A}{W} (P - 1)$$

$$\int_{S_0}^{S''} \alpha' dS = \frac{A}{W} \left(\int_{S_0}^{S_1} P \cdot dS - \int_{S''}^{S_1} P \cdot dS \right) - \frac{A}{W} (S'' - S_0)$$

$$= \frac{A}{W} \left[\frac{P_0 S_0}{(n-1)} \left\{ 1 - \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{n-1} \right\} - \frac{P'' S''}{(n-1)} \right.$$

$$\left. \left\{ 1 - \left(\frac{S''}{S_1} \right)^{n-1} \right\} \right] - \frac{A}{W} (S'' - S_0) \quad (18)$$

式(18)の S'' は

$$S'' = \left(\frac{P_1}{P''} \right)^{1/n} S_1 \quad (P_1=1) \quad \text{ゆえに} \quad S'' = \left(\frac{1}{P''} \right)^{1/n} \cdot S_1 \quad (19)$$

である。

4. 実験例による計算結果

先に述べたように、筆者らの実験条件では、たまめ深さ $S_1=4\text{cm}$ のとき $\alpha_1=1$ を満足すると考えられる (図 2 参照)。

放電溝体積 V_0 は前記²⁾ のごとく

$$V_0 = a \times S_C$$

a : 放電痕面積, S_C : 電極間距離

実験例

放電条件: 電極間距離 $S_C=3.85\text{mm}$, 充電エネルギー 4000 Joule (10kV, 80 μ F) における放電痕の代表例を図 3 に示す。この放電痕面積 a は

$$a=42\text{mm}^2$$

図 3 電極放電痕

図 4 たま飛行距離によりたま底面の受ける最高圧およびポリトロピック指数算定図表 (ただし、たま重量 $W=1.108\text{kg}$ のとき)

$$V_0 \div 0.16\text{cm}^3$$

$$V_1 = A \times S_1 = 50.28\text{cm}^3 \quad (A=12.57\text{cm}^2)$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{S_0}{S_1} = \frac{1}{314}$$

(この実験では $S_1=40\text{mm}$ であった)。

$n=1.10 \sim 1.40$ における P_0, P_m を (12), (13) により求め図に示すと、図 4 のようになる。

他方上記の放電条件で (放射角 45° , $W=1.108\text{kg}$) 打出したたまの射程 L は平均約 $L=10\text{m}$ 。

(14) より

$$P_m' = \frac{WL}{2V_1} \div 11.018 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_m = P_m' + 1 \div 12.018 \text{ kg/cm}^2$$

この結果から、図 4 破線に示すごとく n および最高圧力 P_0 が求まる。すなわち、この条件では $n=1.235$, $P_0=1210\text{kg/cm}^2$ である。

この結果を一般水蒸気に対する指数と比較してみる。

水蒸気の場合、 n の値は一般に加熱蒸気および飽和蒸気の場合、それぞれ $n=1.2$ および 1.1 であることが知られているが、加熱蒸気の n の値にほぼ等しい結果が得られたことは興味ある問題である。

以上の実験および理論計算により、この実験例におけるたま底面に受けた最高圧力 P_0 および指数 n が求まった。

いま、たま重量 $W=1.108\text{kg}$ 重、投てき距離 $L=10\text{m}$ の場合における砲身中のたま位置 S'' と作用圧力 P' あるいは加速度 $\alpha \cdot g$ の関係を示すと、図 5(a) のごとくである。また、式(15), 式(17)より、たま位置とたま速度 ($S-v$) の関係およびたま移動の時間関係 ($S-T$) を求めると

(b)図のごとく、また $P-T$ の関係は (c)図のごとくなる。

以上の推論では、圧力の立上り ($P-S$) を無視してきたが、これは放電にともない発生する蒸気は、放電液の蒸気と電極材料の蒸発ガスの混成ガスと考えられ、それらの混成割合が求まらないためである。いま極端な場合を考えて、放電液は蒸発せず電極材料の蒸発ガスだけであると仮定して、 $P-S$ 線図で立上りが直線的であると考えると

$$\alpha_0' = \frac{A}{W} P_0', \quad \alpha_{m0}' = \frac{\alpha_0'}{2}$$

したがってこの間の平均加速度

$$\alpha_{m0}' \cdot g = \frac{\alpha_0'}{2} \cdot g$$

(a) 砲身中のたま移動位置—たま底面の受ける圧力

(b) 砲身中のたま移動位置—たま速度および経過時間

(c) 圧力—時間

図 5 理論式による計算図表

$$T_0 = \left(\frac{2S_0}{g \cdot \alpha_{m0}} \right)^{1/2} \quad (21)$$

で表われ、この関係を圧力—時間図に示すと図 5(c)の点線のごとくなる。しかし、実際の場合は放電液蒸気を含むから、蒸気化した放電液の体積を V_0' とすると α_0 or P_0 が最大に達したときのたまの移動距離 S'' は

$$S'' = S_0 - S_0' \quad \left(S_0' = \frac{V_0'}{A} \right) \quad \text{であらわされ}$$

実際の立上り時間 T_0' は

$$T_0' = \left\{ \frac{2(S_0 - S_0')}{g \cdot \alpha_{m0'}} \right\}^{1/2} \quad (22)$$

となり、 $T_0' < T_0$ であることがわかる。

(a) 板金変形試験用のたま

(b) 変形を受けた板金試験片

図 6

図 7 たま位置—たま底面の受ける圧力

T_0 を考慮に入れない場合は図 5(c) の実線のごとくである。実際の場合は放電液の蒸気と、電極材料の金属蒸気の混成ガスであると考えられるから、これら 2 つの曲線の間にくはずである。

5. 金属板のひずみ速度の算定

5.1 実験方法ならびに算定方法

(1) たま底面に図 6(a)のごとく試片金属板を取りつけ発射するとき、金属板は球面状に変形する。その一例を図 6(b)に示す。

(2) 他方、この変形と等しい変形を起こすに要する静圧 (相当静圧 P'') を求める。

(3) 放電成形における動圧が金属板に作用して金属が変形するとき、相当静圧 P'' 以降においては、変形仕事に関与しないと仮定する。すなわち、図 7 において、斜線をほどこした部分に相当するエネルギーが金属板の変形に関与すると考えると、前述のごとく $\alpha' \cdot g = \frac{P' A}{m}$ の関係を考慮代入して $g \int_{S_0}^{S''} \alpha \cdot dS$ を求めることができる。この間の平均加速度 $\alpha_m'' g$ は式(16)で求め、したがって変形に要する時間 T'' は

(a) 油圧プレス装置

(b) 油圧プレス装置の内部構造

(c) 静的仕事—試験片くぼみ
動的仕事—試験片くぼみ

図 8

$$T'' = \left(\frac{2S'}{\alpha_m'' g} \right)^{1/2} \quad S' = S'' - S_0 \quad (22)$$

いま図 6(b)に示すくぼみから求めたひずみを ε とすれば、平均ひずみ速度 v_s は

$$v_s = \frac{\varepsilon}{T''} = \varepsilon \left[\frac{\alpha_m'' \cdot g}{2(S'' - S_0)} \right]^{1/2} \quad (23)$$

ただし $\varepsilon = \frac{l-d}{d}$ (d : 受型直径, l : 変形板金の軸断面における弦の長さで、くぼみ深さ δ と d から算定した)

したがって相当静圧 P'' および指数 n が既知であれば、式(16), (17), (18), (19) の関係から v_s が計算できる。

5.2 静圧試験装置

静圧試験に使用した試験装置の外観を 図 8(a)に示す。これは 5 ton 油圧ジャッキを改造したもので、1000気圧までの使用が可能である。金属板加工部の構造を図 8(b)に示す。

5.3 静圧試験の一例

上記の装置により、銅板 0.3mm 厚を形穴 3φにより静圧試験をした結果、静圧 P とくぼみ深さ δ 、またはくぼみ体積 V_δ の関係を 図 8(c)に示す。

$P-V_\delta$ の図式積分から静圧仕事 w_s が求まるが、単位面積当り静圧仕事 w_s を求め図中に示した。

5.4 ひずみ速度の計算例

上記静圧試験に使用した銅板 (0.3mm厚) を図 6 に示したようにたま底面に取付け (たまには型に相当する 3φ穴を設けた。なお、たま重量 $W=1.108\text{kg}$, たま込め深さ $S_1=4\text{cm}$) 投てき実験をした結果、投てき距離 (射程) $L=10\text{m}$ で銅板のくぼみ深さ $\delta=0.57\text{mm}$ 。

式(20)より S_0 は

$$S_0 = \frac{40\text{mm}}{314} = 0.0127\text{cm} \quad S_1 = 40\text{mm}$$

n および P_0 は §4 よりそれぞれ、 $n=1.235$, $P_0=1210\text{kg/cm}^2$, $P_1=1\text{kg/cm}^2$ 。図 8(c)より、 $\delta=0.57$ の相当静圧 P'' は破線で示すごとく取って、 $P''=540\text{kg/cm}^2$ 。

式(19)より

$$S'' = \left(\frac{1}{540} \right)^{1/1.235} \times 4 = 0.0245\text{cm}$$

式(17), (18) より T'' を求めると

$$T'' = 52\mu\text{sec}$$

となる。すなわち、たまと放電液との間の圧力が $P_0 \rightarrow P''$ (1210 $\rightarrow$ 540) に要する時間は $52\mu\text{sec}$ で、その間に試験片のくぼみ変形 $\delta=0.52\text{mm}$ が完了したと見なすことができる。

$\delta=0.52\text{mm}$ に対するひずみ ε は $\varepsilon=0.08$

ひずみ速度を v_s' とすれば

$$v_e' = \frac{\epsilon}{T''} = \frac{0.08}{5.2} = \frac{0.08}{52 \times 10^{-6}} \approx 1500$$

となる。

今までの計算は放電の立上り時間を無視して、 P_0 以降について計算した。なお実際の立上り時間は式(22)で表わされるが、蒸発した水の量に相当する S_0' がわからないから計算できない。いま放電溝蒸気が放電液以外の蒸気だけであるとして式(21)により計算してみると、 $60\mu\text{sec}$ となるが、他の研究者の報告を総合して参照すると、立上り時間は大体 $5\sim 20\mu\text{sec}$ 程度で、 $3\sim 12$ 倍の開きがある。これは実際の立上りの式、式(22)から考えて、 S_0' が $S_0' = S_0 \times \left(1 - \frac{5\sim 20}{60}\right)^2$ であることを示すと考えられる(この場合ピーク圧力 P_0 が 1210kg/cm^2 で、臨界圧 $P_K = 225.7\text{ato}$ をはるかに越えた圧力である)。したがって、放電溝に発生した蒸気の成分割合(蒸発した放電液体積: 蒸発した電極金属の体積)が大体 $99:1\sim 9:1$ 程度であると考えられ、第4節の終わりにのべた実際の立上りはほとんど定積的であると考えられる。

6. あ と が き

1) 液中放電成形における圧力源は、放電溝に発生した高圧蒸気であると考えて、ガス膨張の概念で整理しても大きい間違いはなさそうである。

2) 筆者らの実験範囲では膨張比(V_1/V_2)は314で大体300程度と考えられ、電極間距離(3.85mm), 4000 Joule の放電で放電溝に発生蒸気のポリトロピック指数 n は $n=1.235$ で表わされ、この値は加熱蒸気のそれにほぼ等しい。

3) 液中放電成形においてプレス仕事に關与するのは $P-V$ 線図において大体相当静圧までと考えられる

が、仕事能力の基準は放電溝に発生したガスの圧力と体積($P_0 \cdot V_0$)であることは明らかである。一般にこの技術開発に対して P_0 に主力をそそがれているようであるが、同時に放電溝体積を無視することはできない。そして放電溝エネルギー E は

$$E = K \left(\int_{V_0}^{V_1} p \cdot dV - V_1 \right)$$

膨張比(V_1/V_2)=一定(筆者らの場合は314)

と考えられるから、 E は P_0 の自乗および V_0 に比例することが明らかである。

4) 放電成形におけるひずみ速度について一例を示したが、これは試験片の材質は無論、その寸法形状および加えるエネルギーの相関関係によりいちぢるしく左右されるので別にくわしく報告する予定である。

5) 筆者らは投てき形出力測定装置におけるたまた底面に働く液圧を対象として推論してきたが、放電溝自体の圧力および放電溝エネルギーの液中伝達機構にまで言及するにはまだ問題が残っている。すなわち放電槽の大きさ、形等による反射波およびその干渉等について今後追求しなければならない。

6) 放電溝に発生するガス組成体積の割合(放電液蒸気: 電極材料の金属蒸気)は大体 $99:1\sim 9:1$ 程度と考えられる。

(1964, 7月13日受付)

参 考 文 献

- 1) 奥島啓式他: 液中放電成形の基礎的研究(第2報), 精密機械, 29巻11号(1963)879.
- 2) A. S. Zingerman: Propagation of a Discharge Column, Soviet Physics—Technical Physics, Vol. 1, No. 5 (1958)992.