

拡管電磁成形に関する研究 (第1報)

相 沢 友 勝

A Study of Electromagnetic Tube Bulging (1st Report)

Tomokatsu AIZAWA

An aluminum tube workpiece is bulged electromagnetically using a solenoidal coil inserted in it. The rapidly changing magnetic field associated with the discharge current from a capacitor bank through the coil induces eddy currents in the workpiece, and the electromagnetic bulging force acts on it. Our experiments clarify the effect of bank capacity ranging from 7 μF to 1400 μF on the electromagnetic tube bulging.

1. ま え が き

金属製円管の内側または外側に円筒状コイルを置き、これにコンデンサ電源からパルス大電流を流すと、円管は衝撃電磁力を受けて変形する。このようにして金属管を塑性加工する技術を電磁成形などと呼んでいる^(1~7)。この技術は少量特殊部品の製造のほか、難加工材、新素材の新しい加工法として必要となってきた高エネルギー速度加工法の一つである。工業的には自動車、航空・宇宙、原子力業界の一部で使われている^(1,7,8)。電磁成形加工には、慣用的なプレス成形加工と比べ次のような特徴がある。

- (1) 加工エネルギーの調整が容易である。
- (2) 高速瞬間加工なので加工時間を短縮できる。
- (3) 加工中、機械的な接触がないので、潤滑剤が不要である。
- (4) 磁界の強さ、形を制御できるので、型がなくてもある程度の形に成形できる。
- (5) 被加工材が汚れないので、加工後に洗浄しなくてよい。
- (6) 被加工材をビニールなどで密封したまま加工することもできる。
- (7) 型(雌型)を使えば、複雑な形状のものまで高精度で加工できる。
- (8) 常温で溶接にかわる圧着接合ができる。
- (9) 被加工材に体積力を加えて加工できる。

本校では共同研究を含め、コンデンサを電源とするパルスパワー技術の応用として、拡管電磁成形の実験を行

平成2年9月7日 受理

っている^(9~17)。我々が行った実験の特徴の一つは、コンデンサ電源の容量を7~1400 μF の範囲で変えたことである^(9,10,13)。この範囲では、コンデンサ容量が影響し、電磁力の働きかたに大きな違いが生じる。ここではコンデンサ電源の充電エネルギーを一定としたとき、容量が拡管成形過程及び成形量に及ぼす影響を中心に実験の概要を報告する。

2. 拡管電磁力

管に働く電磁力の大きさ及び特徴について述べる⁽¹³⁾。金属製円管の内側に円筒状コイルを置き、コイルへ角周波数 ω で正弦的に変化するパルス大電流を流せば、管には誘導電流が円周(θ)方向逆向きに流れる。その電流密度を i_θ [A/m²]、そこでの軸(z)方向磁束密度を B_z [T] とすれば、単位体積あたり、径(r)方向に作用する電磁力の大きさ f [N/m³] は次式で与えられる。

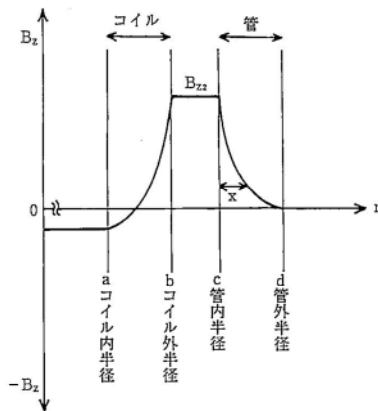
$$f = i_\theta B_z \dots\dots\dots (1)$$

管全体に働く電磁力の大きさ F [N] は次のようになる。

$$F = \int i_\theta B_z dV \dots\dots\dots (2)$$

ここで、積分範囲は管体積であり、 dV は微小体積素である。電流密度 i_θ 、磁束密度 B_z は r 方向に分布しており、電磁力 F を上式から求めるのは容易でない。後述する磁気圧 P_m [Pa] から求めるほうがよい。

管に電磁力が働いているとき、平均的な磁束密度 B_z の r 方向分布は図1のようになる。コイル内側 $r < a$ 及びコイルと管の間 $b < r < c$ では磁束密度を一様としてある。

図 1 平均的な磁束密度 B_z の径方向分布

管内の磁束密度 B_z は表皮効果のため、管内面から r 方向に距離 x [m] の管内で

$$\exp(-\sqrt{\omega\mu\kappa/2} x) = \exp(-x/\delta) \quad \dots\dots\dots (3)$$

にしたがって減少する。ここで、距離

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\kappa} \quad \dots\dots\dots (4)$$

を表皮効果の深さとする。ただし、 κ 、 μ はそれぞれ金属管の導電率、透磁率である。

管内の電流密度 i は θ 方向成分 i_θ だけであり、 $\text{rot } B = \mu i$ から、 $\partial B_z / \partial z = 0$ とすれば、大きさは

$$i_\theta = -(1/\mu) \partial B_z / \partial r \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。(5)式を(2)式へ代入すれば、次式を得る。

$$F = \int (B_z^2/2\mu)(r/r) \cdot n \, dS \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、積分範囲は管表面であり、 dS は微小面積素である。電磁力 F は $B_z^2/2\mu$ を管内面、外面で法線面積積分して求められる。 n は法線方向単位ベクトルである。 $B_z^2/2\mu$ は各面で一様とみなせるので電磁力 F は容易に得られる。図 1 のように管内面の磁束密度 B_z が大きいければ、力 F は r 方向に働き、拡張する。

$$P_m = B_z^2/2\mu \quad \dots\dots\dots (7)$$

を磁気圧と呼んでいる。物理的実体のない磁力線の圧力 $B_z^2/2\mu$ を実在的な磁気圧と呼べるのは、磁束密度 B_z の r 方向分布が存在するとき、そこを流れる電流(電流密度 i_θ)に電磁的体積力(物体力とも呼ばれている)が働くからである。

電磁力は自由電子からなる電流密度 i_θ に直接働く。金属内では電気的中性状態を維持しようと、残された金属原子(正イオン)との間にクーロン引力が生じ、また電子の流れが原子と衝突し、電流に働く力は金属原子に

及ぶ。表皮深さ δ が肉厚に比べて十分小さい場合には、誘導電流は管内側の表面に近い部分に集中して流れる。このとき電磁力 F は表面部分だけにしか働かない。逆に、表皮深さ δ が肉厚に比べて大きい場合には、電流は管肉厚部分全体に分布して流れ、電磁力 F は体積力として肉厚部分全体に作用する。なお、クーロン力は電磁力より十分大きいので、電磁力で電流分布すなわち磁束密度分布が変わることはほとんどない。

コイルと管の間に生じる磁束密度 B_{z2} (図 1 参照) は次のように概算できる。磁束密度 B_{z2} は管に流れる誘導電流が管内側に作る磁束密度である。パルス大電流 I_1 がコイル内側に作る磁束密度を B_{z1} とすれば、コイル内側では B_{z1} と B_{z2} とが逆向きで打ち消しあい、磁束密度は弱まる。表皮効果の深さ δ が管肉厚に比べて小さく、初めの磁束状態(零)が保存されるとするならば、

$$B_{z1} = \mu n I_1 / l \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$B_{z1} r_{ab}^2 \delta = B_{z2} r_{ed}^2 \delta \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$B_{z2} = \mu n r_{ab}^2 I_1 / r_{ed}^2 l \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ただし、 r_{ab} はコイル平均半径、 r_{ed} は管平均半径、 l/n [m] はコイルのピッチである。磁束密度 B_{z2} の値から管に働く磁気圧 P_m (7)式、さらに電磁力 F (6)式を求めることができる。このとき、管に流れる誘導電流 I_2 [A] は、

$$I_2 = (r_{ab}/r_{ed})^2 n I_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。 $(r_{ab}/r_{ed})^2$ は磁束密度を一様とすればコイルと管との磁気的結合係数に等しい。

コイルを流れるパルス電流 I_1 と管を流れる誘導電流 I_2 とが互いに反対向きであり、管に電磁反発力 $F \propto I_1 I_2$ が働くこと直感的に考えることもできる。

3. 電磁成形装置

放電回路、装置概略を図 2 に、装置外観の一部を図 3 に示す。コンデンサ電源 C—放電ギャップスイッチ GS—成形用コイルが放電回路である。コンデンサは単独または並列に使用され、容量を 7, 25, 100, 400, 1400 μF など、充電エネルギーを 1.0, 1.5 kJ などに選んだ。各容量に対する充電電圧を表 1 に示す。ギャップスイッチ GS には主として一般的な気中トリガ・ギャップを、また比較のため真空トリガ・ギャップ⁽¹⁸⁾、低インダクタンスの多重アーク・トリガギャップ⁽¹⁹⁾を使用した。気中ギャップでは、充電電圧に応じてギャップ間隔を 1~8 mm の範囲で変えた。真空ギャップ、多重アーク・ギャップでは、間隔を 3 mm 一定とした。成形用コイルは直径 2 mm の銅線をナイロンまたは塩化ビニール製円柱の溝(ピッチ 3 mm)に 40 回巻いて作られ、外径 37 mm、長さ 120 mm である。コイルのインダクタンスは 14 μH

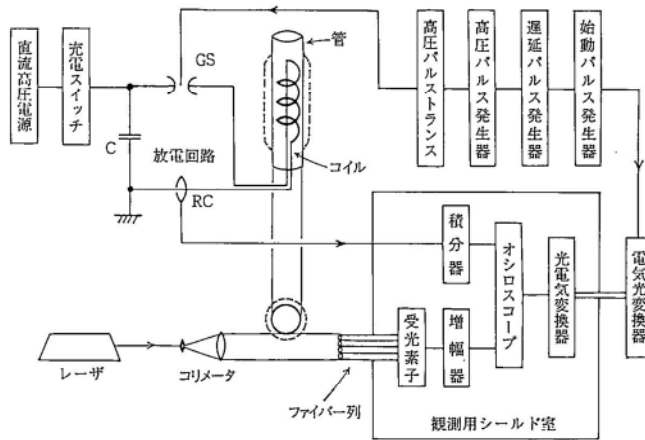


図2 実験装置概略

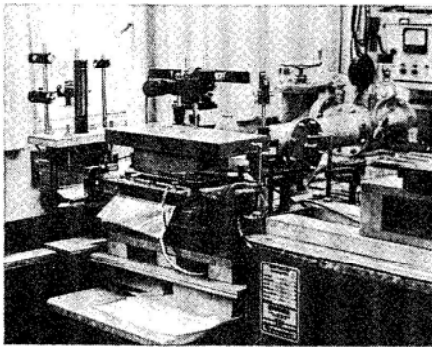


図3 装置外観（コンデンサ電源、ギャップスイッチ、成形用コイル、レーザー、コリメータ、真空排気装置）

である。コイルを除く放電装置の残留インダクタンスは、気中トリガ・ギャップ、真空ギャップを使用するとき $0.5\mu\text{H}$ 程度、多重アークギャップを使用するとき $0.03\mu\text{H}$ 程度であるが、コンデンサ容量を変えているため一定ではない。

成形用コイルのまわりに絶縁用 PET シートを巻き、その外側に試料としてアルミニウム製円管（A1050TD）を配置した。管は外径 40mm 、肉厚 1mm 、全長 180mm の引抜き管であり、これには 400°C で1時間の焼鈍処理をしてある。この状態で放電回路の実効インダクタンスは $3\sim 4\mu\text{H}$ となる。コイルを除く放電装置の残留インダクタンスは、この値より十分小さいことが望ましい。

コンデンサ電源 C を充電後、始動パルス発生器を働かせ、ギャップスイッチ GS を放電短絡すると、コイルへ

表1 コンデンサ充電電圧 [kV]

充電エネルギー [kJ]	コンデンサ容量 [μF]				
	7	25	100	400	1400
1.0	16.9	8.94	4.47	2.24	1.20
1.5	20.7	11.0	5.48	2.74	1.46

放電電流が流れ、管は図2の点線のように径方向へ広がる。管の外側には型やホルダーがないので、この電磁成形は拡管自由成形と呼ばれている。

4. 観測装置及び測定方法

観測装置の配置を図2に示す。放電電流波形の観測にはロゴスキーコイル RC を、拡管過程の観測にはレーザー及び配列形ファイバーセンサを用いた。放電ノイズを避けるため他の観測装置は観測用シールド室内にある。オシロスコープの同期には、光伝送トリガ系統を用いた。レーザーからの光はコリメータで直径約 30mm の平行光に広げられ、アルミニウム管中央の側面に接しながら光ファイバーケーブルの配列面に達している。レーザーには He-Ne ガスレーザー、ファイバーケーブルには直径 0.75mm （コア径 0.74mm ）のプラスチックファイバーを使用した。ファイバーケーブルの配列面は12本のケーブルからなり、これらは拡管する方向にすきまなく並んでいる。アルミニウム管が拡がると、配列面へ達している光は次々とさえぎられる。

まず、各ファイバーケーブルからの光を1本ずつ別の受光素子（フォトダイオード）に導き、光電変換後、反転増幅し、その変化を4現象オシロスコープで観測した。

典型的な波形は図 4 のようになる。図 4(a)で上からコイルを流れる電流波形、その下に各ファイバークーブルからの光に対応する信号(光信号と呼ぶことにする)が現れている。ケーブルへの光がさえぎられると、その時刻でオシロスコープ上の光信号は、立ち上がっている。図 4(b)では最も下の光信号に、立ち上がりが見られない。これは、そのファイバーの位置まで拡張していないことを示す。

次に、一つの受光素子へ、ファイバークーブルを 2 本ずつ導き同様に観測した。典型的な波形例を図 5 に示す。図 5(a)で、光信号の立ち上がりは 6 点観測されている。図 5(b)では、下の光信号の立ち上がりが 1 回である。2 本のケーブルのうち片方の位置まで拡張しているが、他方の位置まで拡張していないときの信号波形である。このようにして最大 8 点の立ち上がり部分を 1 台のオシロスコープで同時に観測できる。実際の観測には主としてこの方法を用いた。

以上のようにして得られる観測波形から次のようにして拡張時の径方向変位と時間の関係を求めた。

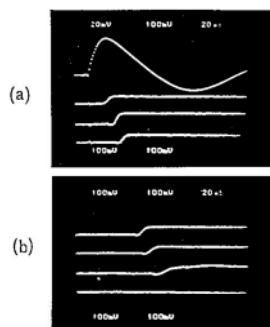


図 4 観測波形例(1)

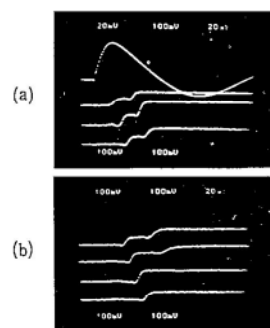


図 5 観測波形例(2)

- (1) 電流波形の立ち上がり時刻を $t=0$ とする。
- (2) 管側面に接している光が入射するファイバークーブルからの光信号が立ち上がる時刻を、拡張開始時刻として時間軸上に○印で示す。
- (3) 各光信号の立ち上がり部分に着目し、明から暗への立ち上がり時間を記号 τ で、振幅が 50% になる時刻をその上に○印で示す。
- (4) 径方向変位は、振幅が 50% になる時刻でファイバークーブルの中心位置とする。
- (5) 最終変位すなわち成形成量を管中央の外径をノギスで測定して求める。

今回の配列形ファイバースенサーによる測定法は、光の屈折、乱反射などの影響を多少受ける。この影響は信号の立ち上がり時間のなかに誤差として含まれている。なお、放電ギャップスイッチの光をファイバークーブルに入射させない工夫はしてある。

成形された管の形状測定には、形状測定器(コントレーサ)を用いた。

5. 実験結果

5.1 放電電流波形

コンデンサ電源 C から成形用コイルへ流れる典型的な放電電流波形を図 6 に示す。コンデンサ電源の容量を小さくすると、電流の最大値は大きくなり、振動周期が短くなる。最大電流(波高値)は容量 $C=7\mu\text{F}$ のとき 22kA である。波形は振動周期が一定の減衰振動波形になっていない。これは、コイルと電磁誘導結合するアルミニウム管が拡張し、放電回路の実効インダクタンスが変わるためである。ここでは、波形第 1 半波の半周期時間から便宜的に振動周波数 ν を求めることにした。この値は容量を小さくすると、同じ容量のときでも充電エネルギー

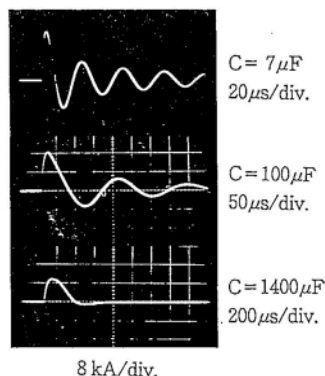


図 6 放電電流波形 (1.5kJ, 気中ギャップ使用)

によって異なった。振動周波数 $\nu = \omega/2\pi$ と(4)式から算出した表皮効果の深さ δ を表2に示す。容量 $7\mu\text{F}$ のとき、 $\delta = 0.4\text{mm}$ であり、この値は管肉厚 1.0mm に比べ小さい。容量 $1400\mu\text{F}$ の場合、 $\delta = 2\text{mm}$ で、管肉厚に比べ大きい。

電流波形の最大値を(10)式へ代入すれば、そのときの磁束密度 B_{z2} 、さらに磁気圧 $P_m = B_{z2}^2/2\mu$ を求めることができる。求めた結果を表3に示す。また、管に流れる誘導電流 I_2 を(11)式から計算すると、最大電流 $I_1 = 22\text{kA}$ のとき、 0.71MA となった。

5.2 成形過程の観測

管の径方向変位は電流波形に対応して図7のように変化した。電流波形時間軸の数値は変位のものと同じである。変位は時間とともに増加し、成形過程にはコンデンサ電源の容量 C によって次のような違いがあった。

(1) 拡管開始時刻について、拡管が始まる時刻は容量を小さくすると早くなる。 $7, 25\mu\text{F}$ で約 $10\mu\text{s}$ 、 $1400\mu\text{F}$ では $40\mu\text{s}$ である。

(2) 拡管終了時刻について、終了する時刻は容量が小さくなると早くなる。 $7\mu\text{F}$ で約 $60\mu\text{s}$ 、 $1400\mu\text{F}$ で約 $110\mu\text{s}$ である。

(3) 拡管速度、成形量について、容量 $25, 100\mu\text{F}$ のとき拡管速度及び成形量が大きくなる。速度は最大で約 120m/s 、成形量は最大 5.2mm である。

(4) 電流最大時の拡管率について、電流が最大のとき拡管している割合は、容量とともに増加する。 $7\mu\text{F}$ で最

終変位に対し 0% すなわち、電流が最大になっても拡管していない。 $1400\mu\text{F}$ で約 30% になる。

5.3 成形量のコンデンサ電源容量依存性

成形品の一例を図8に示す。左端は拡管前の試料である。拡管している部分がコイルの位置に対応している。管は径方向へほとんど一様に拡がった。ノギスで測定した管中央直径の円周方向角度依存性を表4に示す。成形された管の形状を形状測定器で求めた例を図9に示す。縦軸は径方向最終変位、横軸は管中央からの軸方向距離である。管中央近くの変位は一定しており、変位はコイル端で滑らかに減少し、コイルのないところでの変位は零となることがわかる。ここでは、成形量として管中央外径の増加、外周の伸びを対象として、円周方向ひずみ $\epsilon_\theta = (D - D_0)/D_0$ (12)

を考える。ただし、 D 及び D_0 は拡管後及び拡管前の管外径であり、 D として平均値を採用した。ひずみ ϵ_θ と外径 D はかとの関係を表5に示す。なお、管が外側へ拡がるので、軸方向への縮みも $1 \sim 2\text{mm}$ 存在した。軸方向ひずみは円周方向ひずみに比べて十分小さかった。

ひずみ ϵ_θ はコンデンサ容量によって図10のように変化した。容量を広い範囲で変えたので、ひずみ ϵ_θ のコンデンサ容量依存性がはっきり表れている。ひずみ ϵ_θ の最大値は充電エネルギー 1.5kJ のとき約 0.26 である。容量を極端に大きくまたは小さくすると、ひずみすなわち成形量は小さくなっている。成形量は $25, 100\mu\text{F}$ のとき大きい。同じ容量で気中ギャップと真空ギャップの場

表2 表皮効果の深さ δ

コンデンサ容量 [μF]	深さ δ [mm]
7	0.4
25	0.6
100	1
400	1.5
1400	2

(1.5kJ, 気中ギャップ使用)

表3 最大電流 I_1 [kA]、最大磁束密度 [T] 及び最大磁気圧 [MPa]

コンデンサ容量 [μF]	電流 I_1 (測定値)	磁束密度 (計算値)	磁気圧 (計算値)
7	22	7.4	22
25	20	6.7	18
100	16	5.4	12
400	12	4.1	6.5
1400	10	3.4	4.5

(1.5kJ, 気中ギャップ使用)

表4 管中央直径の円周方向角度依存性

任意の基準に対する角度 [度]	管中央直径 D [mm]
0	50.5
30	50.2
60	50.4
90	50.7
120	50.5
150	50.8

(1.5kJ, 気中ギャップ使用)

表5 径方向最終変位、外径増加 $D - D_0$ 、外径 D 及びひずみ ϵ_θ

最終変位 [mm]	$D - D_0$ [mm]	D [mm]	ひずみ ϵ_θ
1	2	42	0.05
2	4	44	0.10
3	6	46	0.15
4	8	48	0.20
5	10	50	0.25
6	12	52	0.30

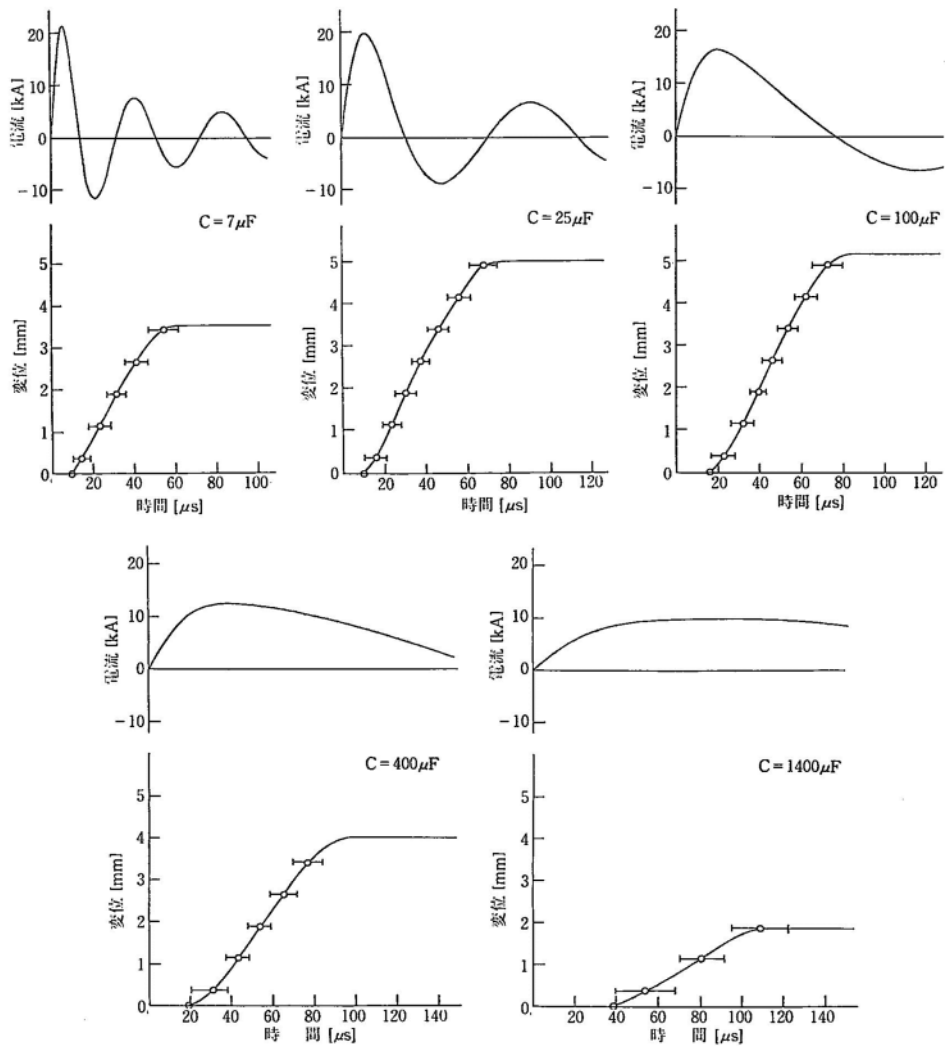


図 7 放電電流及び径方向変位の時間変化 (1.5kJ, 気中ギャップ使用)

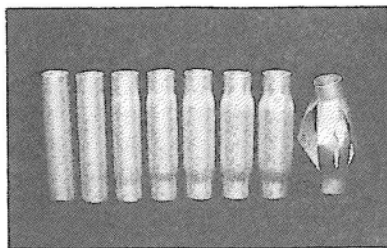


図 8 成形品 (多重アーク・ギャップ使用)

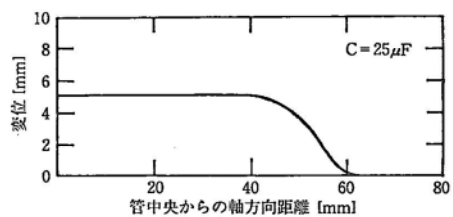
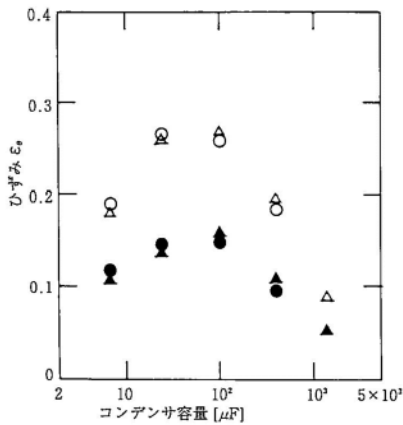


図 9 成形形状 (1.5kJ, 気中ギャップ使用)


 図 10 ひずみ ε_θ のコンデンサ容量依存性

- , △ 1.5 kJ
- , ▲ 1.0 kJ
- , ● 真空ギャップ使用
- △, ▲ 気中ギャップ使用

合を比べると、成形量はギャップ間隔の短いほうで大きかった。

成形量のコンデンサ電源容量依存性を示す図10の結果には、コイルを除く放電装置の残留インダクタンス（約0.5 μ H）の影響が含まれている。残留インダクタンスが影響しない実験結果を以下に述べる。

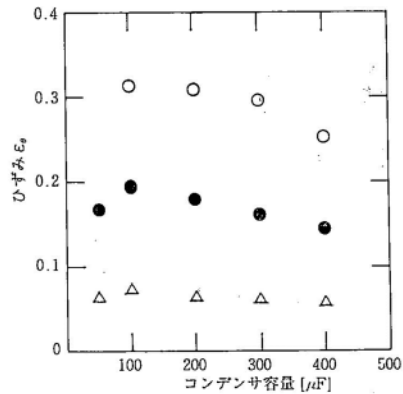
5.4 低残留インダクタンス放電装置での実験

放電装置の残留インダクタンスを0.03 μ H以下に改善して同様に実験した結果を述べる。円周方向ひずみ ε_θ のコンデンサ容量依存性を図11に示す。ひずみ ε_θ の最大値は充電エネルギー1.5 kJのとき約0.31である。装置改良前の結果（図10）に比べ、ひずみ ε_θ が2割程大きくなっている。放電電流も増加していた。装置を低インダクタンス化したため、容量を図10の範囲まで変えることはできなかった。この実験は、効率よく拡張成形するためには、放電回路の残留インダクタンスを小さくし、コンデンサ容量を適当に選ぶ必要があることを示している。

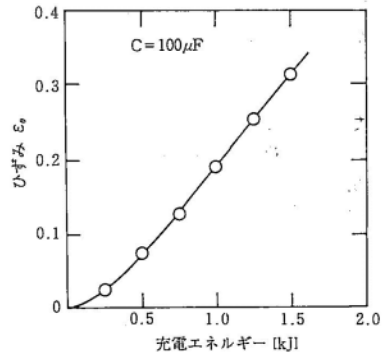
ひずみ ε_θ はコンデンサ電源の充電エネルギーを0.25 kJごとに増加させると、図12のように大きくなった。エネルギー1.5 kJまでは正常に拡張したが、1.75 kJの場合に管は図8右端のように破損した。

5.5 コイルの耐久性

実験に使った成形用コイルに働く力、コイルの耐久性について述べる。拡張の際、コイルに働く電磁力として次のようなものがある。


 図 11 ひずみ ε_θ のコンデンサ容量依存性

- 1.5 kJ 多重アーク・ギャップ使用
- 1.0 kJ 多重アーク・ギャップ使用
- △ 0.5 kJ 多重アーク・ギャップ使用


 図 12 ひずみ ε_θ の充電エネルギー依存性
（多重アーク・ギャップ使用）

- (1) 個々のコイル巻線を径方向内向きに圧縮する力。
- (2) 個々のコイル巻線を軸方向中央へ圧縮する力。
- (3) 漏れ磁束があり、磁界の径方向成分によって端部の巻線が受ける軸方向の力。

実験はコンデンサ電源の充電エネルギー1.0, 1.5 kJを中心に2 kJまで行われた。400回以上の実験中、コイルは破損しなかった。ただし、コイル外側に管を置かないで同様に実験すると、コイルが破損することがあった。この理由は、次のように考えられる。管がないとき、上記(1)の圧縮力が働かず、逆にコイル巻線を径方向外向きに拡げる力が作用する。この力に対する対策をしていない。このため、コイル巻線がゆるみ、溝から外側へはみ出す。はみ出した巻線に対して軸方向の力(2)が働い

て、コイルの原型がなくなる。

6. 検討及びまとめ

衝撃電磁力でアルミニウム円管を拡張させる実験を行った。コンデンサ容量を大きく変え、成形過程及び成形量の違いを実験的に示した。容量により放電電流波形が変化し、これに応じて拡張開始時刻、終了時刻、拡張速度、成形量などに差が生じた。ここでは、電磁力の働きかたを中心に違いを検討する。

まず、コンデンサ容量が $7\mu\text{F}$ と小さい場合を考える。表皮効果の深さ δ は 0.4mm であり、電磁力は管内側表面部分に確実に作用する。その最大値は他の場合と比べて最も大きい。しかし、次のような理由で成形量が低下する。

(1) 電流波形の振動周波数が大きいいため、放電回路の抵抗が大きくなる。

(2) 電流値が大きいいため、ジュール損失が大きい。

(3) 電流波形の減衰が比較的早く、成形時の平均的な電磁力が小さくなる。

(4) 電流波形の第1半波で生じる電磁力が慣性をともなう拡張運動に効果的に作用しない。

次に、コンデンサ容量が $1400\mu\text{F}$ と大きい場合を考える。表皮深さ δ は 2mm となり、電磁力は管肉厚部分全体に体積力として働く。電磁力の最大値は小さいが、力は比較的長時間にわたって作用する。しかし、電流波形の立ち上がりが遅く、発生する磁束はアルミニウム円管を内側から外側へ通り抜けやすく、管に働く電磁力は低下する。このため成形量が小さい。

今回の実験結果は、表皮深さの大小で電磁力に二つの働きかたがあることを示している。働きかたが両極端の場合、成形量は小さく、効率的でない。単に効率的に成形するのが目的なら、コンデンサ容量すなわち放電電流の振動周波数を適当に選べばよい。電源エネルギー $CV^2/2$ のうち塑性加工に使われる割合は、最大で25~30%と思われる⁽⁹⁾。電磁力の働きの違いを成形に生かしたい場合も考えられる。同じ形状に成形するにしても、電磁力の働きかたを選ぶことで製品の内部組織などに違いが予想される。

このような電磁力による成形加工を効率よく行うためには、コンデンサ電源容量の選択のほか、放電装置の改良、特に放電回路の残留インダクタンスを減らす必要がある。この理由は、成形用コイル(インダクタンス $14\mu\text{H}$)に金属管を被せた状態で、この部分の実効インダクタンスが $3\sim 4\mu\text{H}$ と大きく低下するからである。また、コイルの改良、選定が残されている。現在、総合的な効率改善をめざして実験を続けている。いずれ続報で述べたい。

謝 辞

本実験を進めるにあたり、ご指導くださった電気通信大学 鈴木秀雄教授、村田眞講師、ご支援ご協力くださった都立航空高専 小山内行雄助教授、本校機械工学科 嵯峨常生教授、西村惟之教授、広井徹磨助教授、星志行先生、電気工学科 西村信雄教授(当時)、曾小川久和教授(当時)、吉田健教授、吉沢昌純講師ほかの皆様に深く感謝いたします。また、実験を行った学生諸君に感謝するとともに、本校のバルスパー技術を他分野へ応用するため、今後ともご協力いただけますようお願い申し上げます。

なお、コンデンサ電源の購入などに昭和61~63及び平成元年度の東京都研究奨励費を使用した。関係された皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 前田：「塑性加工」誠文堂新光社 p. 532 (1972)
- (2) 根岸、鈴木：日本機械学会誌91, 1249 (1988)
- (3) 村田、鈴木：電磁力関連のダイナミクス講演論文集(機械学会) p. 63 (1989)
- (4) 鈴木：塑性加工30, 489 (1989)
- (5) 村田、相沢、鈴木：塑性加工春季講演会論文集 p. 607 (1989)
- (6) 村田、相沢、鈴木：機械学会66期通常総会講演概要集 p. 277 (1989)
- (7) 佐野、村越、高橋、寺崎、松野：機械技術研究所報告150号 (1990)
- (8) 小出：塑性加工学会高エネルギー速度加工分科会報告14回 (1989)
- (9) 相沢、小山内、五十嵐、石橋：38回塑性加工連合講演会論文集 p. 351 (1987)
- (10) 相沢、小山内、上原、武富：塑性加工春季講演会論文集 p. 611 (1989)
- (11) 相沢、斎藤、関口、外山：電気関係学会東北支部連合大会講演論文集 p. 1 (1989)
- (12) 相沢、関口、外山：塑性加工春季講演会論文集 p. 631 (1990)
- (13) 相沢：電磁力関連のダイナミクス講演論文集(電気学会) p. 322 (1990)
- (14) 村田、相沢、大段、鈴木：40回塑性加工連合講演会論文集 p. 623 (1987)
- (15) 村田、相沢、鈴木：第3回材料の衝撃問題シンポジウム(材料学会) No. 29 (1989)
- (16) T. Aizawa, M. Murata, H. Suzuki: Proc. 3rd Int. Conf. on Tech. of Plasticity, Kyoto, 1990, Vol. 3, 1593
- (17) 村田、相沢、鈴木：塑性加工春季講演会論文集 p. 603 (1989)
- (18) 相沢：電気学会論文誌B105, 407 (1985)
- (19) 相沢、吉沢、佐藤：平成元年電気学会全国大会講演論文集2, p. 154