

# 電磁力による成形加工

鈴木秀雄\* 村田 眞\*\*

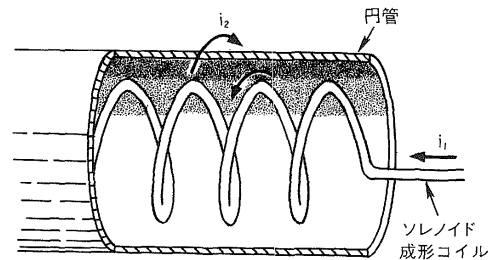
## 1. 緒言

電磁成形法は磁界のエネルギーを瞬時に直接金属である被加工材に加えることによって、変形加工を行うものであり、高エネルギー速度加工法に属する塑性加工法の一つである。塑性加工における2次加工の慣用的なものとは大きく異なる点は、エネルギー源の種類とその放出方法及びダイスのみで加工することが可能なことなどである。電磁成形法は電気伝導度の良い銅やアルミニウムには適する加工法であるが、金属材料として最も使用量の多い鉄系材料に対しては、必ずしも適している加工法であるとはいえないために、現状は工業的には限られた材料と成形目的に対してのみに用いられているに過ぎない。しかし、材料のリサイクルや製品の軽量化の要求が増大している今日において、アルミニウム系材料に対する需要は今後ますます増加し、それにとまって、その種の材料に適する加工技術の開発要求が増大してくることが予想される。電磁成形法はその要求に対応できる一つの有力な加工法となるであろう。ここでは電磁成形法の原理、特徴及び実際の加工応用例について解説を試みる。

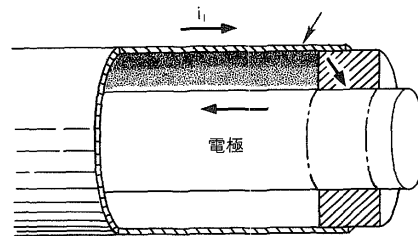
## 2. 電磁成形法の概要

### 2.1 基本原理

フレミングの左手の法則でよく知られているように、電流と磁界の相互作用によって生ずる電磁力を利用した代表的なものがモータであり、その電磁力を直接塑性加工に利用したものが電磁成形法である。1950年代後半にアメリカで開発された



(a)電磁誘導方式



(b)直接通電方式

図1 電磁成形法の基本的な2方式

この技術は、1960年代前半から加工機“マグネフォーム<sup>1)</sup>”という商品名で販売されており、金属加工の組立の分野で利用されてきた。

電磁成形法には電磁誘導方式<sup>2)</sup>と直接通電方式<sup>3)</sup>が考えられている。以下に円管の拡管成形における二つの方式について説明を加える。

図1 (a) は電磁誘導方式の模式図であり、円管の内側にソレノイド成形コイルを挿入し、コイルに衝撃大電流を流すことによって生ずる変化磁界により、導体の円管に誘導電流を誘起させる。

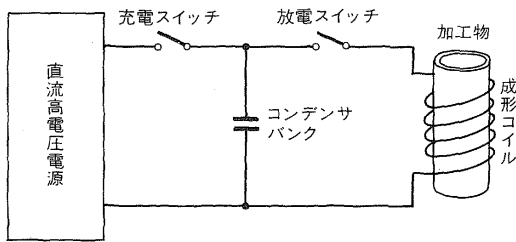


図2 電磁成形の基本的構成要素

コイルの1次電流  $i_1$  による磁界  $H_1$  と、円管の周方向上に反対方向に流れる誘導電流  $i_2$  の間に電磁力が発生し、この時円管は外側に向かう力を受けるため拡管されバルジ成形される。この場合、円管は一回巻のコイルと見なせるため、ソレノイドコイルの単位長さ当りの巻数を  $n$  とすれば、誘導電流は  $i_2 = ni_1$  となる。円管に作用する電磁力は誘導電流の大きさに比例するために、コイルに流れる電流の値から考えられるよりも大きな変形をすることになる。そのため、この成形における成形効率は以下に述べる直接通電方式と比較して高い。

直接通電方式の略図を示したものが、図1 (b) であり、電磁誘導方式と比べると単純な構成となっている。電流  $i$  は外側の円管、接続部分及び内側の電極部分へと流れる。円管と電極とに流れる電流は逆方向となるために、互いに反発力を生じ円管はバルジ成形される。

電磁誘導方式はコイルによって作り出された磁界によって被加工材に電磁誘導による起電力を生じさせるために、誘電電流は被加工材の比抵抗によって影響を受け、抵抗値の大きい材料の加工においては不適である。一方直接通電方式においては、被加工材は成形回路の一部となるため、電磁誘導方式よりその影響を受けにくい。さらに電磁誘導方式は電磁力の発生源となるコイルの耐久性が問題となるが、直接通電方式ではコイルに相当する電極は銅の丸棒を使用するため、耐久性が問題となることはない。しかしながら、直接通電方式は流れる大電流によって被加工材と電極の接触部において放電損傷が生じ易いことと、放電成形装置において、成形部（被加工材と電極）のインピーダンスが極めて小であるために、成形装置回

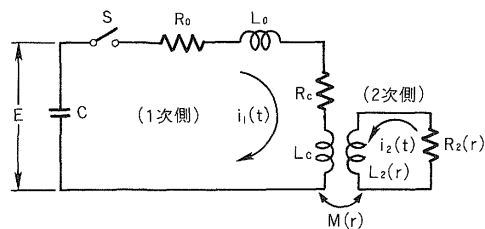
路のインピーダンスを極めて低くする配慮が不可欠である。そのために直接通電電磁成形については筆者らによる研究報告<sup>4),5),6)</sup>が見られるだけで、実際の応用例はほとんど見られない。そこで、ここでの以後の解説は電磁誘導方式についてのみ記述する。

## 2.2 基本的構成要素

電磁誘導方式では成形コイルによって強力な磁界を生じさせなければならない。そのためにはコイルにできるだけ大電流を流さなければならない。

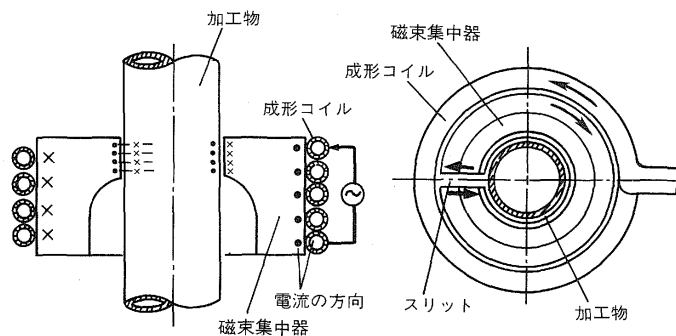
そこで、コンデンサに電荷を蓄えた後に、その電荷を瞬時に放出するコンデンサの放電過渡現象が利用される。実際の電磁成形機の主要部を模式的に示したものが図2である。この成形機はコンデンサと成形コイルのほかに、商用200Vの電源より所定の直流高圧まで昇圧してコンデンサに大電荷を蓄えるための直流高圧電源と充電・放電スイッチで構成されている。実用的には、電磁成形機には高圧電源に対する安全装置や充電・放電のための制御回路等が必要となる。図2に示すように、成形コイルの内側に円管を設置し、充電回路のスイッチを閉じ、コンデンサに充電した後に、放電回路のスイッチを閉じると、衝撃大電流がコイルに流れ、瞬間的な強磁界が作り出され拡管される。また、円管の外側にコイルを配置すれば、図2とは反対に、管は内側に向かって縮管されることになる。また、この電磁成形において、円管を1巻のコイルと見なし、これを電気の等価回路で示せば図3のようになり、電気回路としてはいたって単純なものとなる。

前述したように、コイルのみで成形を行う場合には、コイルの耐久性が問題となる。そこで、実際に工業的に電磁成形を使用する場合には、成形コイルと合わせて磁束集中器<sup>7)</sup>を用いることが多い。図4は磁束集中器の原理を示したものである。成形コイルに流れる電流  $I_1$  により、磁束集中器には図に示したような方向の電流  $I_2$  が誘起される。磁束集中器に軸方向のスリットが入っているために、磁束集中器の内側にも電流が流れる。磁束集中器の内側に円管等が設置されると、磁束集中器内側と円管のすきまの空間に磁束が集中されて円管が縮



1次側（成形機）  
 $i_1(t)$ ：コイル電流， $R_c$ ：コイルの電気抵抗， $L_c$ ：コイルのインダクタンス， $R_0$ ：コイルを除いた部分の電気抵抗， $L_0$ ：コイルを除いた部分のインダクタンス， $C$ ：コンデンサの容量， $M(r)$ ：相互インダクタンス  
 2次側（加工物）  
 $i_2(t)$ ：誘導電流， $R_2(r)$ ：加工物の等価電気抵抗， $L_2(r)$ ：加工物の等価インダクタンス

図3 電磁成形法の電氣的な等価回路



× 紙面に垂直に向う電流  
 ● 紙面から垂直に出てくる電流

図4 磁束集中器の原理

管されることになる。この場合には、成形時にコイルに作用する反力の大部分が磁束集中器で支持され、成形コイルの破壊が防止される。また、同図のように段状の突起部を設けた磁束集中器では、突起部での磁束密度が高くなり、局所的な部分に電磁力を集中できる。1個の成形コイルでも磁束集中器を交換することにより、各種の寸法の管を種々の形状に成形することも可能となる等の利点がある。しかし磁束集中器設計には機械的にも電氣的にも成形コイルの場合と同じ配慮が必要であり、銅等の良導体で製作されている。

### 2.3 電磁成形法の特徴

電磁成形法の特徴を長所と短所に分けて記述す

ると、以下のようなものである。

長所：

- (1) 成形時に被加工物の表面に型や加工媒体が接触していないために、これらによる表面の損傷や汚染がない。
- (2) かしめ加工による物体の締結を行う場合には、二つの部品のはめあい部分には厳しい寸法公差を必要としない。
- (3) ガラス、セラミックあるいはプラスチック、ゴム等と金属とのかしめ加工による締結が容易に行える。
- (4) 放電成形や爆発成形の場合のように衝撃圧力を伝達するための水や油等の媒体を必要としない。

表1 各種金属材料の加工特性

金属材料	比抵抗 μΩ-cm	加工性	金属材料	比抵抗 μΩ-cm	加工性
アルミニウム	2.78~2.87	◎	金	2.44	◎
青銅	13~16	○	銀	1.62	◎
燐青銅	13~16	○	鉄	10.0	○
ペリリウム青銅	6.4	◎	炭素鋼	11~8	○
ペリリウム銅	10	○	ステンレス鋼	75.0	×
黄銅	6.2~5.8	◎	銅	19.82	×
銅	1.69	◎	マグネシウム	4.35	◎
洋白	30~33	×	チタニウム	3.2	◎
パーマロイ	30	×	タングステン	5.5	◎
錫	13.05	○	タルタン	14	○
亜鉛	5.8	◎	カドミウム	7.54	◎

◎優良 ○可 ×直接加工困難 (Cu又はAlドライバーを使用して間接加工が可能)

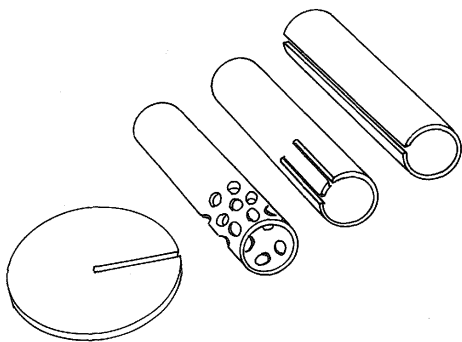


図5 加工困難な形状の例

(5)電磁成形は一般的に大気中で行われるが、真空中、高温中または極低温中等の特殊な雰囲気での加工も可能である。

(6)成形用の型としてはポンチまたはダイスのどちらか一方のみで良い。

(7)加工装置は電氣的に操作することが可能であり、その機能を自動化することが容易である。

(8)加工装置の電氣的条件を設定すれば、その後の加工において常に同じ加工力を反復して発生できるので信頼性の高い加工が可能である。

(9)加工サイクルが短く、加工の源が電気であるために直接の加工費が安価である。

短所：

(1)被加工材は良導体でなければならない。電磁成形法の材料の加工特性については表1<sup>8)</sup>に示す。

(2)現在の実用的な加工では板厚の厚い材料の成形は困難である。

(3)被加工材に切り欠きやスリットが有るような図5に示すものを加工することは困難である。

(4)成形コイルの耐久性が不十分である。

(5)高電圧大電流を使用するために取扱いにおいて十分の配慮が必要である。

### 3. 実際の応用例

電磁誘導方式では成形の種類によって、成形コイルの形状や成形コイルと被加工材との位置関係が異なる。基本的な成形としては円管の拡管・縮管及び平板の成形等<sup>9)</sup>が考えられるが、工業的な実際の加工では縮管が主でわずかに拡管の例も見られるが、平板成形においては若干の研究例<sup>10)・11)</sup>が見られるだけである。ここでは円管の縮管・拡管の実際の例を示す。

#### 3.1 縮管成形

縮管成形は図2に示すように、ソレノイド成形コイルの内側に被加工材を配置して成形を行う。このことによって管の内側に置かれた型によるせん断加工、管と管あるいは管と軸の接合、管端のシーリング等が可能となる。この縮管成形においては図4で示した磁束集中器を用いることが一般的である。電磁成形法において、最も早くから実用化への努力がなされたのが縮管を利用した加工

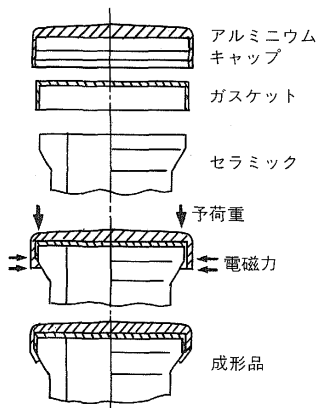


図6 分流加減器の口金を取り付

である。

高電圧サージに用いられる分流加減器のセラミックにアルミニウムの口金を取り付けたものを図6<sup>12)</sup>に示す。従来この加工は接着剤で固定されていたために寿命や接着処理に問題があった。しかし、電磁成形法を用いるとこの問題点が解決されただけでなく、作業手順が簡単となり製品の歩留まりも向上した。この例のように、電磁成形法を用いて金属とセラミックの接合を行えば、セラミックを破損することなく金属との接合が可能な場合がある。このような例として高圧のヒューズの口金<sup>13)</sup>やセラミック製のミサイルのノーズ部でのアルミニウムバンド<sup>14)</sup>の取り付けにも利用されている。

自動車については、GMの乗用車のユニバーサルジョイントのヨークの駆動軸の接合を示したのが図7<sup>15)</sup>である。ここで駆動軸は外径76mm、肉厚1.6mmの炭素鋼(引張強さ49kgf/mm<sup>2</sup>)の管のスエージ加工を行ってかしめている。この接合部の強度は駆動軸と同程度であり、溶接した場合と比較して、車の騒音や振動も低下したと報告されている。この加工には48kgJの装置が用いられ、毎時240個の割合で生産が可能であり、一個当りの費用は労賃と成形装置の原価償却費も含めて数十セントということである。

また、電気機器関係では図8に示すように、モータの回転子を円管でかしめることによる組立作業<sup>16)</sup>に用いられている。その他に歯車と軸の接合、タービン車と軸の接合、ボールジョイントのゴムシールの締め付け及び口金のホースのかしめ<sup>17)</sup>等が報告されている。

以上のように、一連の実用例で示されるように、縮管加工は被加工物と他の部品の組立作業に限定されているようである。

### 3.2 縮管成形

縮管成形を利用した加工としては、型成形、せん断、穴あけ、口広げ及びフランジ加工等に利用でき、その用途は広いようであるが、この加工を利用した実際の加工例は縮管の場合と比較してわずかである。

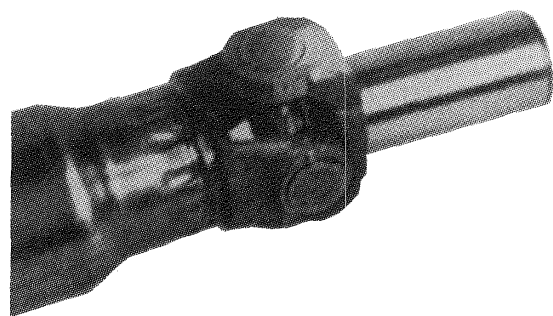
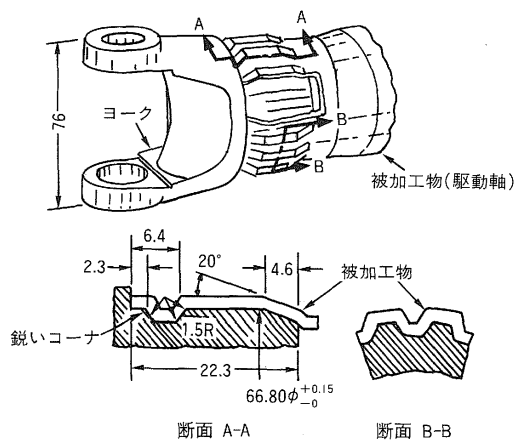


図7 ヨークの駆動軸の接合

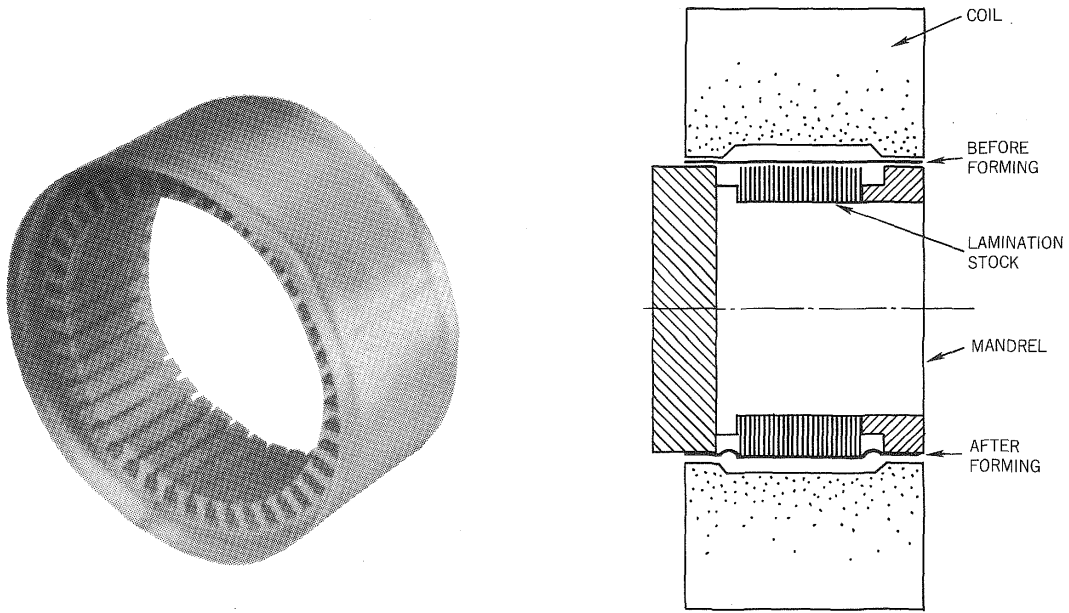


図8 モータ回転子の組立

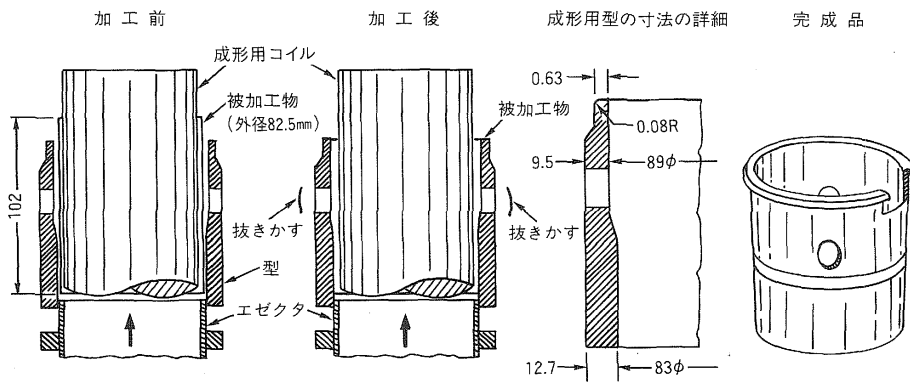
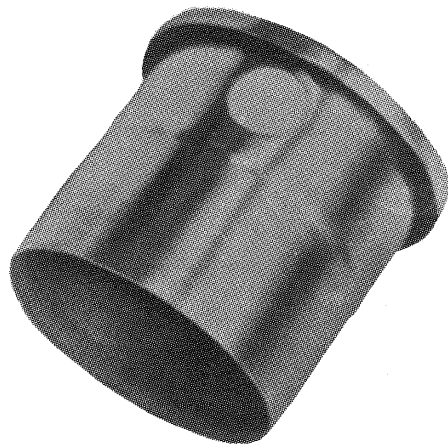


図9 拡管、カーリング及び穴あけ加工を同時に行った例



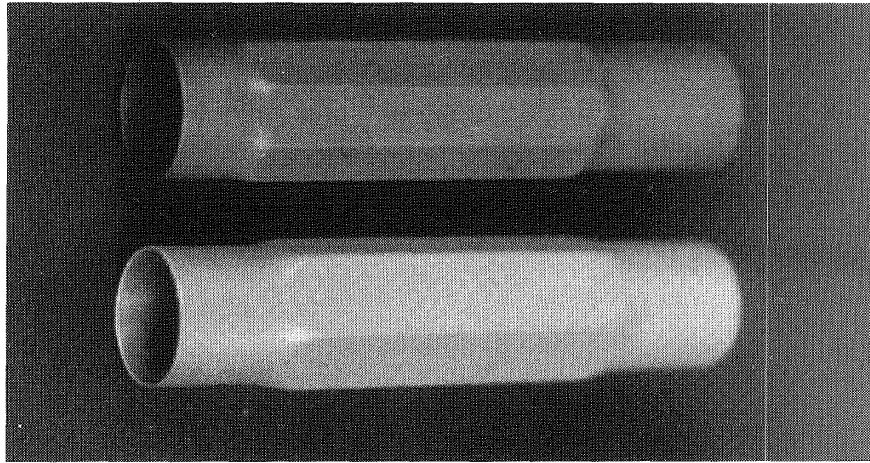


図10 円管から正多角形への型成形

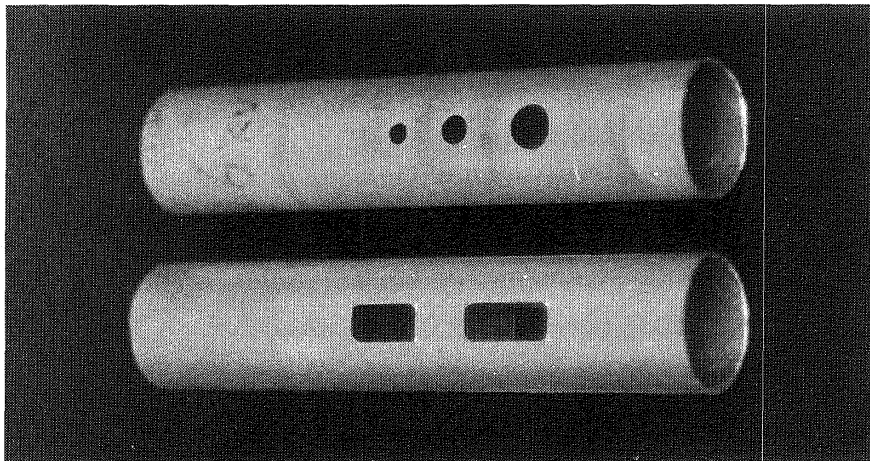


図11 円管の穴あけ加工

拡管を利用すると上述した加工が同時におこなえる。図9は外径82.6mm、肉厚0.89mmのアルミニウム合金(A6060-0)に拡管と管壁への穴あけ及びカーリングが同時になされた例<sup>18)</sup>を示しており、下はその成形品を示している。

その他に筆者らが拡管を利用した加工例を示す。図10は円管の外側に正多角形の形を配置して、円管の一部を正多角形管に成形を行った例<sup>19)</sup>である。上の写真は銅を正八角形に、下の写真はアルミニウムを正六角形に型成形を行った例である。図11は穴あけ加工を行った例<sup>20)</sup>であり、ここでは円形と長方形の穴あけを行っているが、このように

形状と寸法の異なる穴を同時に加工することも可能である。さらに、電磁力の大きさとそれが作用する範囲を制御することで、金型を使用せずに加工物を所定の形状に成形することがある程度可能である。図12と図13はその例である。図12はソレノイドコイルを用いて円管内壁に作用する電磁力を変えることによって、その口拡げ形状を制御した例<sup>21)</sup>である。つまり、その口拡げ形状を口すばりから口広がり形状に成形できる。図13は磁束集中器の形状を変えることによって、バルジ成形形状制御を行ったもの<sup>22)</sup>である。右からその断面形状は三角形、円形、台形となっている。

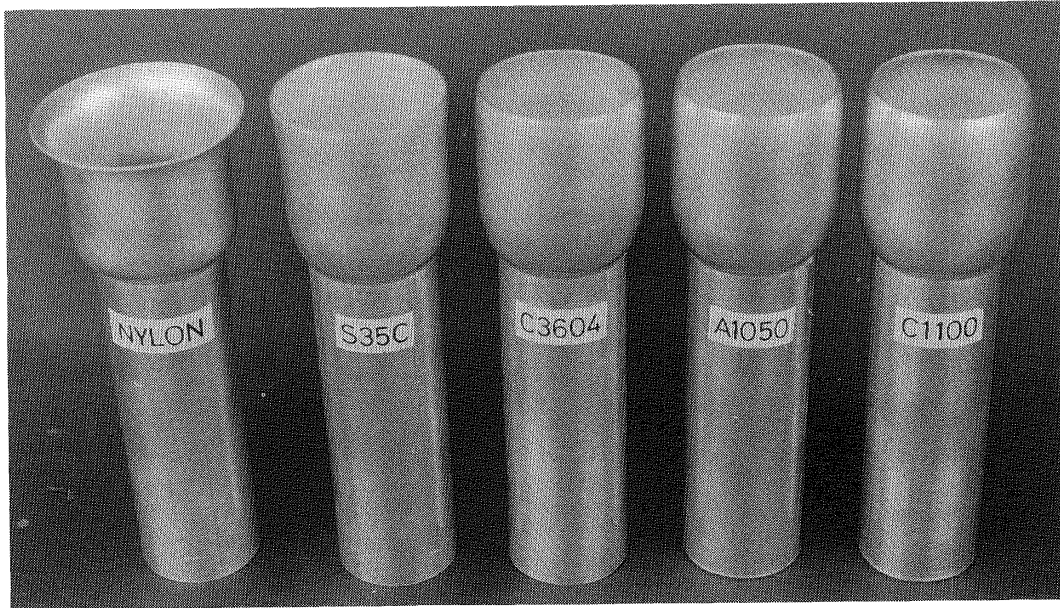


図12 円管の口拡げ加工における形状制御

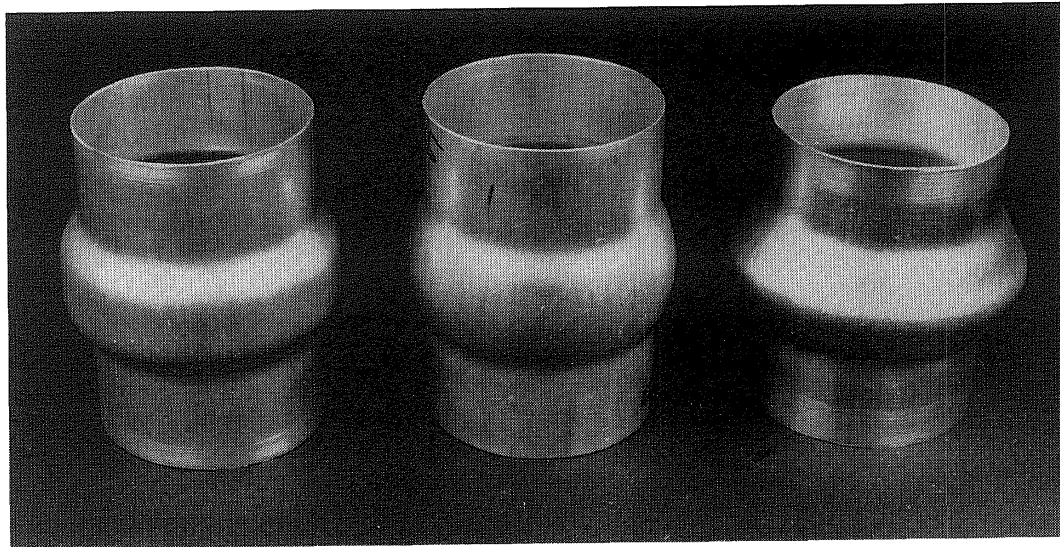


図13 磁束集中器による拡管形状制御

#### 4. 結言

電磁成形法は1950年代の後半にその加工法が考案されており、新しい加工法とはいえない。しかしながら、この加工法はあまり知られておらず、一般的な加工として産業界において広く利用され

ていないのも現状である。これは前述したように、被加工材としては良導体以外は不適であることと、電磁力の発生源であるコイルの耐久性に難点があることなどのためであった。しかしながら、昨今においては電磁成形が適しているアルミニウム系



材料の使用量がますます増加しており、さらに新素材の開発によりコイルの耐久性が向上されることも期待できるであろう。

このように電磁成形を使用するうえでもネックとなっていたことが時代とともに改善されていく傾向がみられる。つまり、この古くて新しい加工法である電磁成形法は、さらに今後の発展の可能性のある加工技術であり、その活躍の場がいつそう拡大されていくものと期待していると同時に、この電磁成形法の発展に微力ながらも貢献していくつもりである。

### 参考文献

- 1) Davis, R.: Developments in High Speed Metal Forming (1970), 258, Machinery Publishing Co. Ltd.
- 2) Bridsall, D.H. et al.: Magnetic Forming, American Machinist, (1961), 117.
- 3) Forth, H.P. et al.: New Ideas on Magnetic Forming, American Machinist, (1962), 92.
- 4) 村田真ほか：直接通電電磁成形による板材成形、日本機械学会論文集 C 編、55-514 (1989), 1526.
- 5) 村田真ほか：直接通電電磁成形における円管のバルジ成形解析、平成2年塑性加工春季講演会論文集 (1990), 627
- 6) 村田真ほか：直接通電電磁成形による薄板の穴あけ加工に関する研究、平成3年度塑性加工春季講演会論文集 (1991), 203.
- 7) Metals Handbook IV (1969), 260, ASM.
- 8) 鎌田武美ほか：電磁成形とその応用、機械の研究、(1967), 446.
- 9) 鈴木秀雄ほか：電磁成形法と工業利用の実際、塑性と加工、25-283 (1984), 694
- 10) 根岸秀明ほか：ソレノイド形コイルによる平板成形、塑性と加工、18-192 (1977), 16.
- 11) 根岸秀明ほか：平板形コイルによる平板の型成形、塑性と加工、18-192 (1977), 197
- 12) Zittel, G.: Magneform on Accepted Production tool, Proc. 5th. Int. Conf. (1975).
- 13) American Machinist, (1964), 62.
- 14) Muller, H.P.: Elektrohydraulisches und Electromagnetisches Umformverfahren, In dust. - Anz. 92-49 (1970), 1100.
- 15) Metals Handbook IV Forming, (1962), ASM.
- 16) Longlois, A.p.: What Magnetic Forming Can Do, American Machinist (1961), 99.
- 17) 鎌田武美ほか：電磁成形とその応用、機械の研究 (1967), 62
- 18) Metals Handbook IV Forming, (1962), ASM.
- 19) 村田真ほか：ソレノイドコイルによる拡張型成形、塑性と加工、21-232, (1980), 439,
- 20) 村田真ほか：ソレノイドコイルによる薄肉円管の穴あけ加工、塑性と加工、23-262, (1982), 1095
- 21) 村田真ほか：テーパ付きソレノイドコイルによる円管の口広げ加工、塑性と加工、29-333, (1988), 1024
- 22) 村田真ほか：磁束集中器を利用した円管の高速バルジ加工、塑性と加工、24-274, (1983), 1120.