

平板状スパイラルコイルによる電磁成形について

On Electromagnetic Forming with a Flat Spiral Coil

樋口 俊郎*

Toshiro HIGUCHI

平板状スパイラルコイルを用いた電磁成形について、被加工材料に働く電磁力の解析の手法として最も適していると思われる実効インダクタンスを導入した等価回路に基づく方法の紹介を行うとともに、実験によって明らかになった基本的な事項についての概要を述べる。

1. ま え が き

材料になんらかの方法で衝撃力を加えて高速変形を生じさせることによって、慣用の加工法では困難である加工を行う方法は高エネルギー速度加工と呼ばれ、塑性加工の新しい分野をなしている。電磁成形は爆発成形、放電成形とともに、この高エネルギー速度加工の代表的なものの一つである。

コンデンサに充電しておいた電荷をコイルに瞬間的に流すことによって時間的に変化する磁界が生じる。この時、コイルの近傍に導電体を置くと、導電体には渦電流が誘導され、この渦電流とコイルの電流との間に互いに反発する方向の電磁力が働く。この衝撃的な電磁力を金属管や金属薄板の高速加工に利用したものが電磁成形である。電磁成形には、コイルと加工対象の形状と相対的な位置関係によって図1に示す3種類の基本的な加工の形式がある。そして、型への成形のほかに、穴あけ、せん断、切起こし、フランジング、コイニング等の多様な加工を単一にあるいは同時に複合して行うことができる。

電磁成形に利用する電磁力の発生現象は電磁気学の知識によって容易に予想できるものであり、特に新しく発見されたものではない。第2次大戦後の強磁界発生技

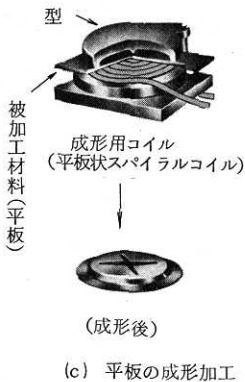
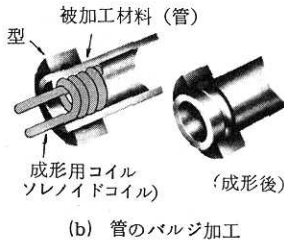
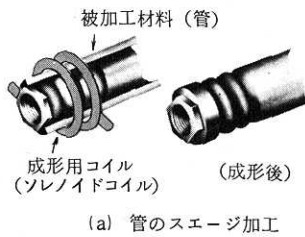


図1 基本的な加工形式

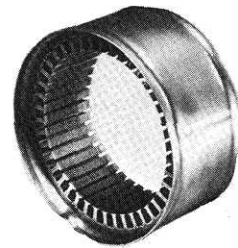


図2 円管をかしめることによって組立てられたステータ

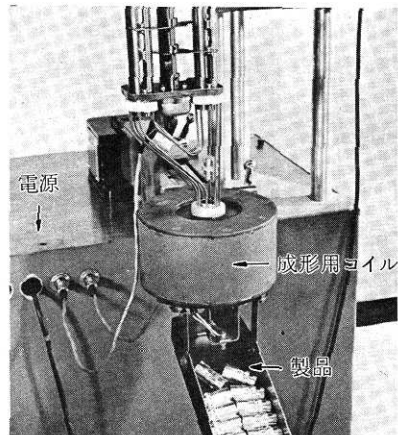


図3 素材の送りとかしめを自動化した例 (60個/分)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

術の研究開発等により金属材料の加工への応用の素地ができ、1957年に銅管、アルミニウム管の縮管加工が実演されたのが電磁成形の始まりとされている。その後、米国のゼネラル・ダイナミクス社の原子力部門により基本特許が出願され、マグネフォームの商標で簡潔にまとめられた実用機の販売が始められた。

電磁成形は、通常の加工法とはかなり異なる特徴を有しており、その長所の主なものを次にあげる。

(a) 加工対象に成形力を伝える媒体を全く必要としないために非接触性の加工を行うことができ、真空中などの特殊な条件下でも使用できる。

(b) 電気的に制御できるために、再現性が良く、簡単に自動化を行うことができる。

(c) 成形用コイルの交換が容易であり、また成形圧力の分布を磁束集中器を用いることによって変化させることができ、汎用性に富んでいる。

このような特徴のある電磁成形の利用の状況を見てみると、米国においては自動車、電機、航空機、原子力などの関係の産業で200～300台ほど使われているようであるのに対し、日本では自動車会社で8台ほど使われているのにすぎない。実用例としては、図2に示すモータのステータの組立て、自動車のユニバーサル継手のヨークの駆動軸への組立て、管端のプラグによるシールなど多数あり、図3に示すように自動化して用いられている例もかなりある。これらの実用例の大部分は、ソレノイドコイルを用いる薄肉管のスエージ加工を締結あるいは組立てに適用したものである。このように管の成形への利用は進んでいるのに対し、図1(c)の平板状スパイラルコイルによる平板の成形についての実用例はほとんど無い。基礎研究についても、管の成形に比べて解析が難しいために遅れている。そこで、著者は平板状スパイラル

コイルを用いた電磁成形に関して、その特徴を把握し応用を進めるための研究を行ってきた。ここでは、主としてその過程で得られたいくつかの知見を述べる。

なお、電磁成形についての紹介ならびに一般的な解説は多数成されているので、文献1)～5)を参考にさせていただきたい。

2. 電磁力について

成形圧力としての電磁力がどのような因子によって決定されるかを理解することは、コイルの設計や最適な電気条件の選定を行うのに不可欠である。

2・1 等価回路による解析 電磁成形では強磁界を得るための電流源として、コンデンサの放電を用いており、図4に示すように、充電用コンデンサと放電スイッチとコイル等々からなる1次回路と被加工材料からなる2次回路が相当インダクタンス M で結合していると思ふことができ、各要素の働きを等価的に表すことができる。この回路は誘導加熱や電磁気探傷についての等価回路に類するものである。

$$F_x = (\partial M / \partial x) I_1 I_2 \quad \dots\dots(1)$$

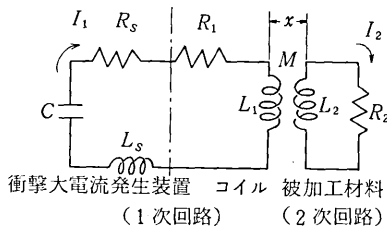
で表せる。従って、被加工材料に働く力は、 $I_1, I_2, \partial M / \partial x$ を知ることによって求めることができるが、円管の成形の場合のように I_2 の分布をかなり正確に推定できる時以外においては、 $I_1, I_2, \partial M / \partial x$ に関係する R_2, L_2, M の値を計算や実測で求めることは一般に容易ではない。

平板状スパイラルコイルによる成形については、2次回路の影響を1次回路に組み入れた回路で考える方が便利である。図4の回路は等価的に図5のように、 L, C, R の直列結合の回路として簡単化できる。 L', R' はそれぞれコイルの実効インダクタンスと実効抵抗を表しており、図4の回路の要素とは次の関係がある。

$$L' = L_1 - \frac{\omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} = L_1 - \Delta L \quad \dots\dots(2)$$

$$R' = R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} = R_1 + \Delta R \quad \dots\dots(3)$$

(ω は I_1 の角振動数)



- I_1 : コイルに流れる電流
- L_1 : コイルのインダクタンス
- R_1 : コイルの抵抗
- L_s : コイル以外の1次回路のインダクタンス
- R_s : コイル以外の1次回路の抵抗
- C : 充電用コンデンサの容量
- M : 相互インダクタンス
- I_2 : 被加工材料の電流
- L_2 : 被加工材料のインダクタンス
- R_2 : 被加工材料の抵抗

図4 基本的な等価回路

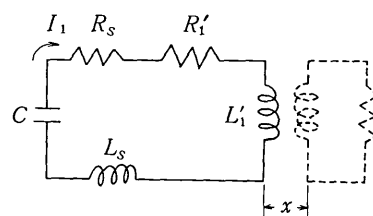


図5 簡易化した等価回路

被加工材料に働く x 方向の電磁力は、

$$F_x = \frac{1}{2} (\partial L'_1 / \partial x) I_1^2 \quad \dots\dots(4)$$

と表すことができる。⁶⁾

充電電圧 V_0 でコンデンサを充電した後、放電させた時、被加工材料に働く電磁力は、放電中において図5の回路要素の値が変化しないと仮定した場合、 I_1 が

$$I_1 = \frac{V_0}{\omega(L'_1 + L_s)} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad \dots\dots(5)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{ただし} \quad \alpha = (R'_1 + R_s) / 2 (L'_1 + L_s) \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{(L'_1 + L_s)C} - \alpha^2} \end{array} \right)$$

のようになるので、式(4)へ代入して、

$$F_x = \frac{1}{2} (\partial L'_1 / \partial x) \cdot \frac{V_0^2}{\omega^2 (L'_1 + L_s)^2} e^{-2\alpha t} \sin^2 \omega t \quad (6)$$

のように表せる。

電磁力は減衰振動する I_1 の2乗に比例し、大きさは時間とともに変化する。放電開始 ($t = 0$) から、 $\tan^{-1}(\omega/\alpha)/\omega$ 後に、電磁力は最大値 F_{xm} をとる。

F_{xm} は次式のように、電磁力を決定する因子の4個の項の積として表せる。

$$F_{xm} = \left(\frac{1}{2} C V_0^2 \right) \cdot \left(\frac{\partial L'_1}{\partial x} / L'_1 \right) \cdot \left(\frac{L'_1}{L'_1 + L_s} \right) \cdot \left(e^{-\frac{2\alpha}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}} \right) \quad \dots\dots(7)$$

式(7)の右辺の第1項はコンデンサの充電エネルギーを表し、第2項はコイルの実効インダクタンスに関する項であり、第3項は L'_1 と L_s の値の比によって決定され

る項であり、第4項は α と ω の比によって定まる項である。

ある充電エネルギーに対して大きな電磁力を得るためには、式(7)の右辺の第1項以外の各項の値が大きくなるようにしなければならない。

2・2 平板状スパイラルコイルについての実効インダクタンスの測定⁹⁾

実効インダクタンス L'_1 は測定を容易に行うことができ、成形用コイルの性能の判定や被加工材料の電磁氣的性質による成形性の良否の予測などに役立つ。

図6に示すように各種材料の円板をコイルと同心かつ平行に置き、コイル表面と円板との距離 x と実効インダクタンス L'_1 の関係を交流ブリッジを用いて調べた結果を図7(a), (b), (c)に1 kHz, 10 kHz, 80 kHzの測定周波数別に示す。測定には巻数(70巻)が多く自己インダクタンスの大きいコイルを用いた。円板に働く電磁力は図7のグラフの曲線の傾き $\partial L'_1 / \partial x$ に比例する。したがって、大きい力を得るためには、被加工材料をコイルに近

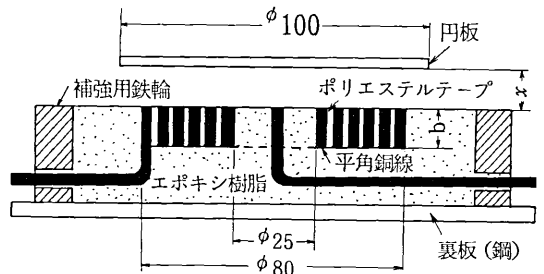


図6 平板状スパイラルコイルの断面概要図および実効インダクタンスの測定のための円板

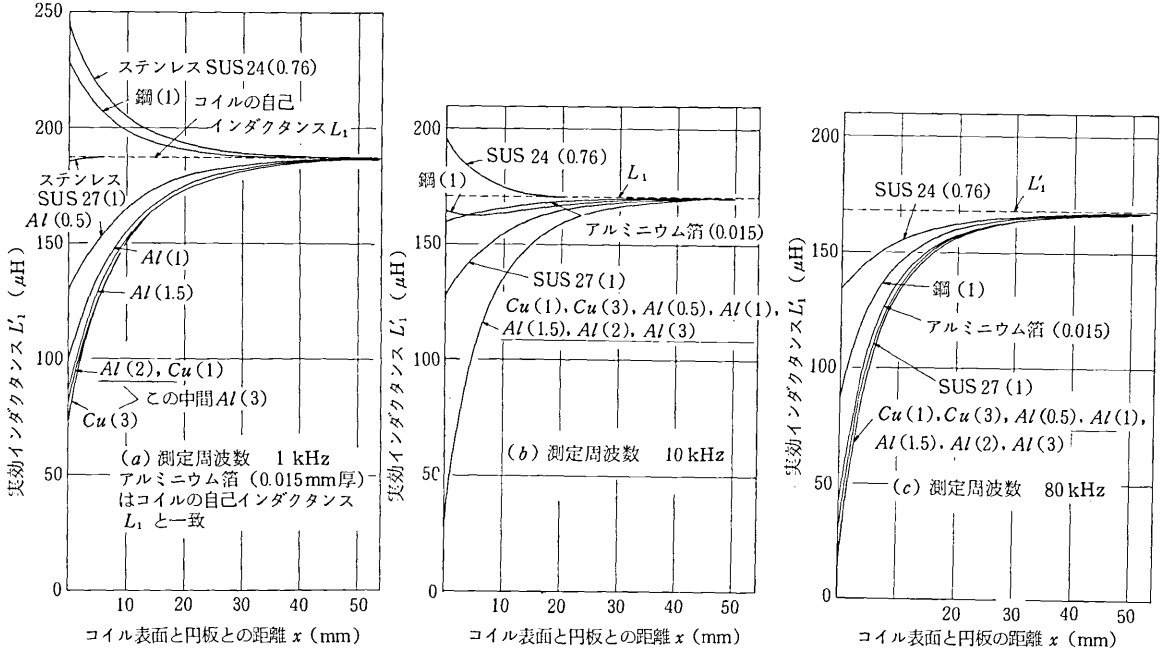


図7 実効インダクタンスの測定結果 () 内の数字は円板の板厚をmmで示す。

づけなければならないことが分かる。また、板厚が薄い場合や、鋼やステンレスのように電気抵抗の大きい材料については、高い周波数を必要とすることが分かる。

図7で、鋼やSUS 24のステンレスについて、周波数が低い場合に $\partial L'_1 / \partial x$ が負になる(コイルとの間に吸引力が働くことを意味する)のは、材料の強磁性体としての性質が実効インダクタンスの測定に併せて表れることによる。強磁性体の強磁界における透磁率は微小磁界でのそれに比べてはるかに小さくなるために、強磁性体材料の電磁成形については微小電流による実効インダクタンスの測定結果に補正を加える必要がある。

3. 平板状スパイラルコイルによる薄板の成形

3・1 成形用コイル 成形用コイルには成形力の反作用力が働くためにこれに耐えるようにする必要があり、また巻線の絶縁に対しても十分に配慮しなければならない。円形あるいは矩形の断面をした銅線を渦巻状に巻いたものが成形用コイルとして用いられている。図6に著者が実験に使用したコイルの断面図を示す。この構造のコイルは繰返し使用に十分耐えることができる。

3・2 圧力分布 平板状スパイラルコイルから被加工材料が受ける電磁力の分布は均一ではなく、図8に示すように、コイルの巻線部に対面する所が最も大きく、コイルの中央部で極めて小さいという特徴がある。⁷⁾ 被加工材料の板面に平行な成分の磁束密度の大きさの2乗がこの圧力と対応しており、磁束密度の測定結果は図8を裏付けている。⁸⁾

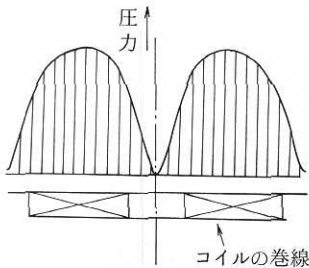


図8 被加工材料へ働く圧力の分布

3・3 自由成形の成形品の形状とひずみ分布 基礎的な実験として、薄板の周辺を円環状の型で固定して成形した成形品を図9に示す。丸みを帯びた円錐形に近い形状であり、コイルに流れる電流の周波数が高いほど中央部の飛び出し方が激しくなる傾向が見られる。¹²⁾ 自由成形の成形品のひずみは図10のひずみ分布の測定結果が示すように材料の中央部に近づくほど大きくなっており、静的な液圧パルジにおける比較的均一なひずみ分布と大きく異なる。

3・4 自由成形の変形過程⁹⁾ 放電開始から所定の時間後の瞬間写真を撮ることによって自由成形の変形過

程を観察した1例を図11に示す。材料の中心軸を含む垂直面での形状の推移として表した図12からも良く分かるように、材料の垂直方向の運動はコイルの巻線部に対面する圧力の最も大きい所から始まり、材料の中央部の運動は遅れるが途中で急激にはね上がって成形が完了する。図12の場合において、材料の中心の垂直方向の移動速度は、成形完了までの平均で140m/sec、瞬間では400m/secを超える。また材料のひずみ速度は時間と位置によって大きく変化するが、半径方向に沿って10⁴/secを超える時もある。

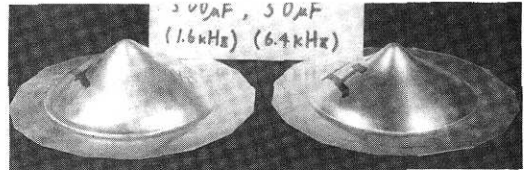


図9 自由成形の成形品例
(被加工材料：アルミニウム軟質材 0.5mm厚、型の穴内径：90mm)

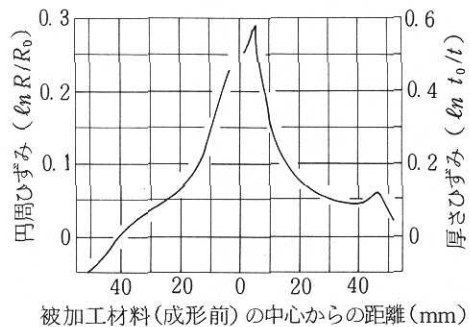


図10 自由成形の成形品のひずみ分布
(被加工材料：アルミニウム軟質材 1mm厚、C=50μF、V₀=6kV)

3・5 成形量への諸因子の影響 自由成形量の大小を表す目安として成形品の張り出し高さを用いることにし、成形量への諸因子の影響を見てみる。

(a) コイルと被加工材料の間の距離の影響

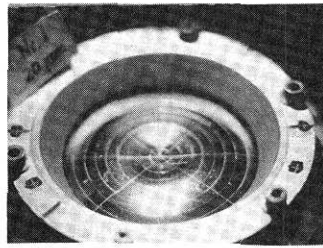
図13の実験結果が示すように、コイルと材料の距離が大きくなると、急激に張り出し高さが小さくなる。これは図7の L'_1 と x の関係のグラフの傾き $\partial L'_1 / \partial x$ が x の増加に伴って急激に減少するためである。

(b) 成形用コイルの巻線の高さの影響⁹⁾

コイルの巻線の高さ b は小さい方が成形量が大きくなるが(図14)、過度に薄くするとコイルの抵抗が増加するために逆に成形量が低下することが予想される。

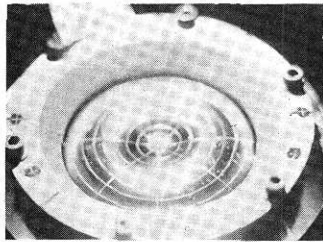
(c) コイルに流れる電流の周波数の影響¹⁰⁾

電流の周波数は、同一充電エネルギーから得られる成形量に大きな影響を及ぼす。周波数が高いほど $\partial L'_1 / \partial x$ の値は大きくなるが、磁界の侵入の程度を示す表皮の深さが材料の板厚よりも小さくなる周波数においては、 $\partial L'_1 / \partial x$ の値は飽和する。⁹⁾これに対して回路の抵抗損は周波

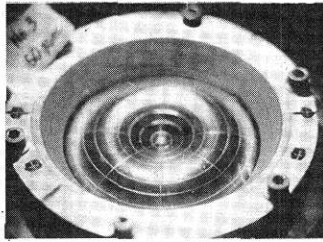


放電開始からの時間

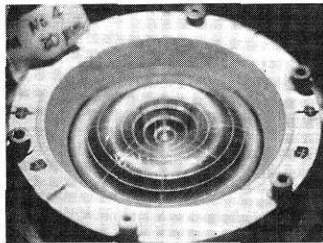
20 μ sec.



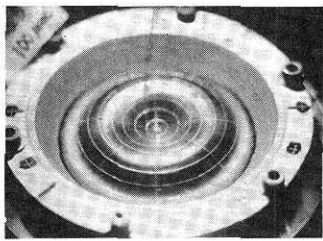
40 μ sec.



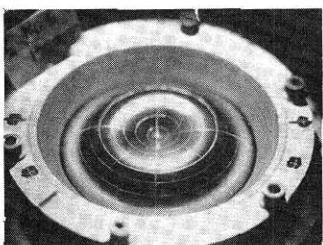
60 μ sec.



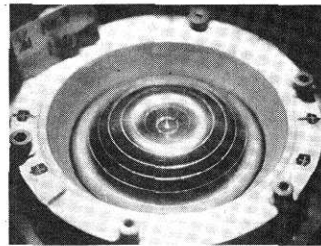
80 μ sec.



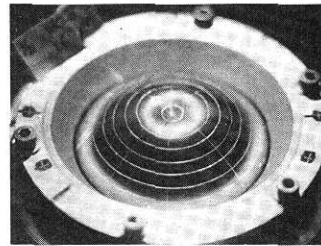
100 μ sec.



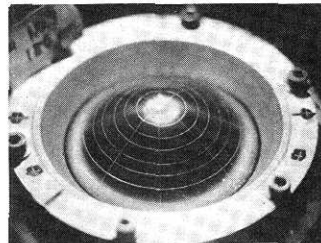
120 μ sec.



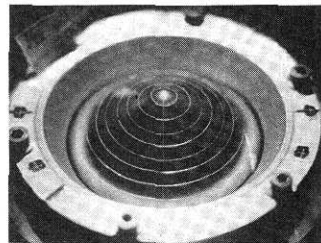
140 μ sec.



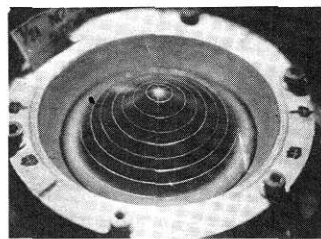
160 μ sec.



180 μ sec.



200 μ sec.



成形完了後

図11 変形の途中の瞬間写真

被加工材料：アルミニウム軟質材(1mm厚)
C=200 μ F, $V_0=3$ kV

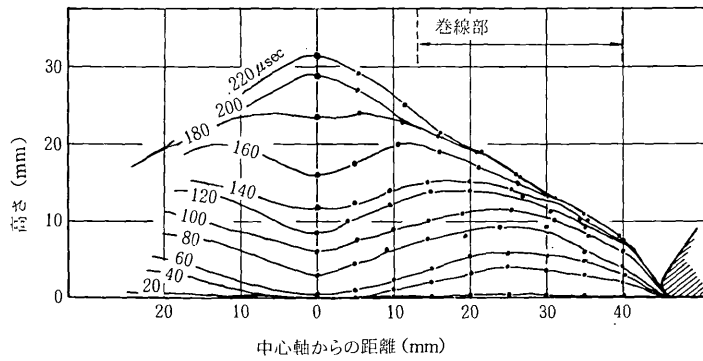


図12 断面形状の推移

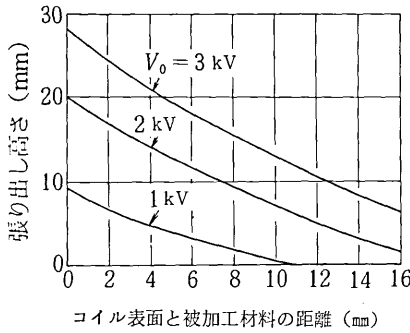


図13 コイルと被加工材料との距離の成形量への影響

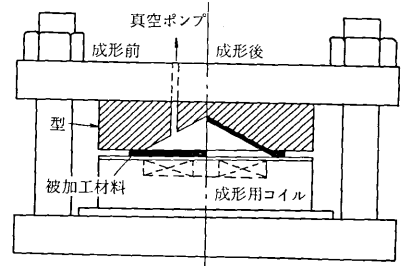


図15 雌型を用いる場合の成形装置

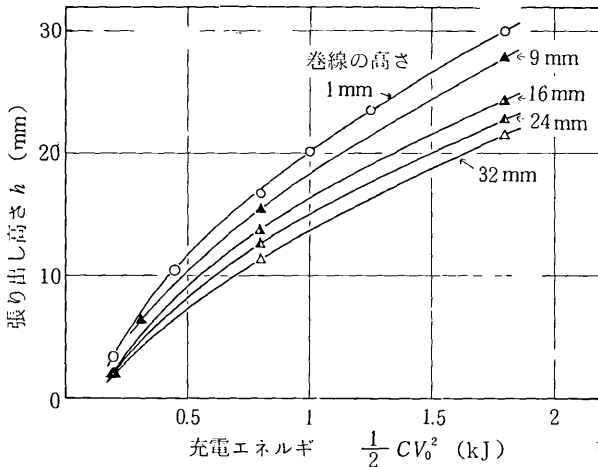


図14 巻線の高さと張り出し高さの関係
C=100μF, 被加工材料: アルミニウム
硬質材(1mm厚)

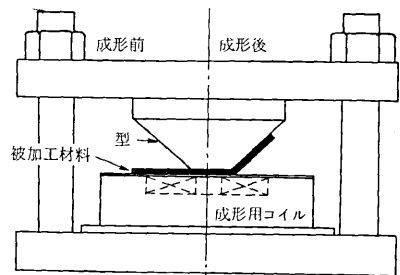


図16 雄型を用いる場合の成形装置

数とともに増加する。したがって、必要以上に高い周波数で成形を行うことは逆効果となる。電気的エネルギーから機械的エネルギーへの変換という観点からは、ある成形に対して、その変形過程および材料の運動に適合した電磁力の波形が存在すると考えられるので、このことを含めて電流の周波数を設定しなければならない。

コイルに流れる電流の周波数は式(5)からわかるようにコンデンサの容量Cとコイルの実効インダクタンスL₁'の値の組合せによって決まる。したがって、成形に最適

な周波数を得るためには、Cを大きくしてL₁'を小さくするか、Cを小さくしてL₁'を大きくするかが問題になる。一般には式(7)の右辺の第3項を大きくするために、L₁'をL_sに比べて大きくする必要があり、Cを小さくする方が良い。ただし、Cを小さくすると、必要とする充電エネルギーを高電圧で充電しなければならないことによる制限を受ける。

3・6 型成形¹¹⁾ 電磁成形では雄型雌型のうちの一方の型しか必要としないという長所がある。したがって、図15に示す雌型を用いる成形と図16の雄型を用いる成形の二通りの方法が可能である。雌型による成形では、型と材料の間の空気が型に忠実な成形を行う上で害になるので、これを真空にしなければならない。適当な充電

エネルギーを選定することによって、自由成形での成形品の形状に近い形状である円錐形や、半球形の成形を図17に示すように、また圧力の大きい所に対応して環状の溝を付けた型による成形を図18に示すように良好に行うことができる。

雄型による成形では、コイルと材料の間を真空にする必要がなく、また凹面の精度を必要とする場合に適しており、また図8の圧力分布を有効に利用できるなどの長所がある。成形品の例を図19に示す。

電磁成形によって、いかなる形状のものも容易に型成形できるというわけではなく、コイルの形状を工夫するとともに成形しようとする製品の形状を電磁成形に適したものに工夫も必要である。

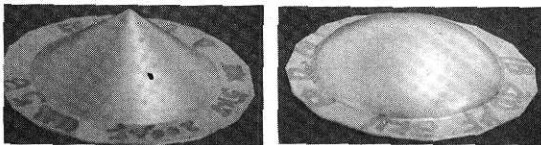


図17 雄型による成形品(I)
(被加工材料：アルミニウム軟質材1mm厚)

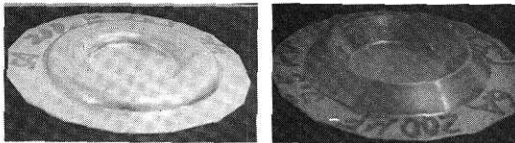


図18 雄型による成形品(II)

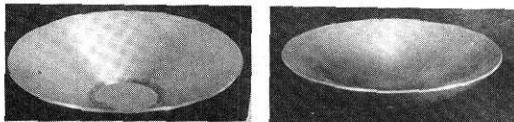


図19 雄型による成形品

3・7 両面成形法¹²⁾ 平板状スパイラルコイルでは被加工材料とは反対の側にも磁界を発生することから、図20に示すようにコイルの両面を用いて、同時に2個の成形を行うことが考えられる。この方法には次の利点がある。

- (a) 単位充電回数当たりの生産量が2倍になる。
- (b) 両側の被加工材料からコイルに働く成形力の反作用力が互いに打ち消し合う方向に働くのでコイルの巻線の保持が容易になる。

ただし、両面成形を行うには、単巻のコイルの場合を除き、図21のように巻線と交差してコイル端子を引き出さなければならない。

両面を用いて自由成形を行うと、同一のコイルの片面のみで自由成形した場合に比べて、約1.3倍の効率の向上を得られることが確かめられた。

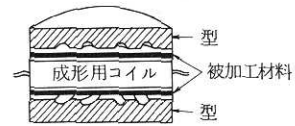


図20 両面成形法

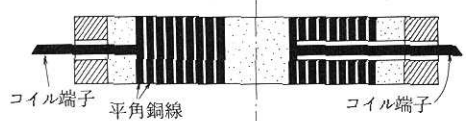


図21 両面成形用のコイルの断面図

4. 電磁プレス^{6),13)}

平板状スパイラルコイルによる電磁力は材料の成形のほか、物体の加速にも利用することができる。この考え方をラムの加速に利用した高速プレスが電磁プレスである。これは図22に示すように、ラムの頭部に付けた導体板に働く電磁力によって加速されたラムの運動エネルギーを用いて各種の高速加工を行おうとするものである。試作機の写真を図23に示す。この試作機ではラムの速度として10 m/secを容易に得ることができ、最高

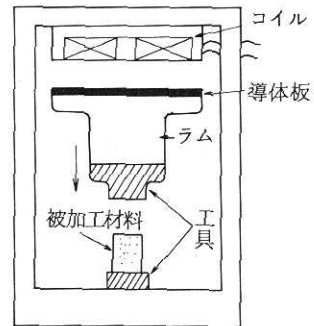


図22 電磁プレスの説明図

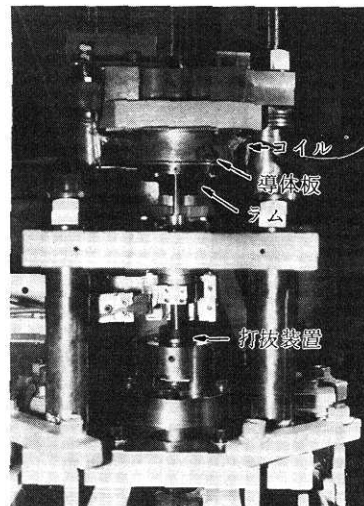


図23 試作した電磁プレス

で23 m/sec を得ている。そして、これを用いて高速打抜きの実験を行うことができた。^{14), 15)} 図24に高速打抜きで得られた製品の切口面の写真を慣用の打抜きでのものと並べて示す。

コンデンサの充電エネルギーからラムの運動エネルギーへのエネルギーの変換効率を大きくするためのコイルに流す電流の周波数の最適値は、電磁成形における最適周波数よりも低い所にあるが、これはラムの速度が、電磁成形での材料の速度よりも小さいためである。

高速プレスでのラムの駆動には、図25に示すように2個のコイルの電流間の反発力を用いることもできる。この形式の電磁プレスは、交直いずれの電流においてもラムの駆動力を得られる特徴があり、比較的低いラム速度を高いエネルギー変換効率で得るために有効である。

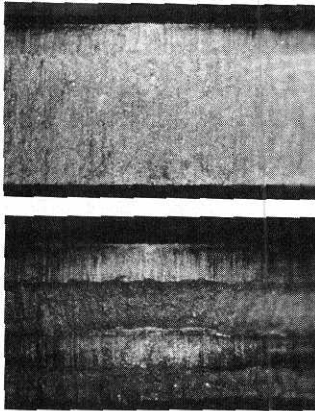


図24 打抜き製品の切口面
材料 SPH 5 3.15 mm厚
ポンチ径 16.127 mm, ダイス径 16.35 mm

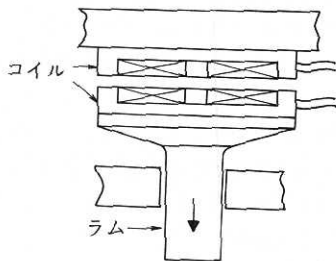


図25 コイル間の反発力を利用した電磁プレス

5. む す び

電磁成形が開発されてから20年になり、限られた範囲では優れた実績をあげているが、まだ広く一般には受け入れられていない。電磁成形がその他の加工法にない特徴を生かして広く生産現場で利用されるためには、基礎研究のほかに、個々の具体的な問題に対して積極的に取り組むことによって得られる技術の蓄積が必要であると考えられる。

電磁成形およびこれに関連した諸現象は、塑性加工への利用に限定されるわけではなく、制御が可能な衝撃力を得るための手段として、また物体の高速駆動の手段として、他の分野における研究等に役立つことが期待できる。
(1977年11月25日受理)

参 考 文 献

- 1) 北条：精密機械，29-10 (1963) 812
- 2) 寺本・清田：塑性と加工，11-119 (1970) 888
- 3) Davies, R. & Austin E. R.: Developments in High Speed Metal Forming, (1970), 253, Industrial Press
- 4) SME, Tool and Manufacturing Engineers Handbook (third edition)
- 5) 前田：塑性加工，(1972), 532, 試文堂新光社
- 6) Maeda, T. & Higuchi, T.: Journal of the Faculty of Engineering, the University of Tokyo (B), 32-4 (1974), 743
- 7) 前田・樋口：第23回塑性加工連合講義集，(1972), 21
- 8) 鈴木・根岸・新井・指宿：日本機械学会論文集，39-317, (1973), 432
- 9) 前田・樋口：第78回電気加工研究会資料78-101, (1975)
- 10) 前田・樋口・池田：塑性加工春季講義集，(1977), 193
- 11) 前田・樋口：塑性加工春季講義集，(1976), 257
- 12) 前田・樋口・池田：第84回電気加工研究会資料，84-103, (1977)
- 13) 前田・樋口：塑性加工春季講義集，(1975), 421
- 14) 前田・樋口：塑性と加工，17-183 (1976), 316
- 15) 前田・樋口・青木：塑性加工春季講義集，(1976), 297

