

金属薄板の電磁張出し成形加工の開発

東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

教授 岡川 啓悟

(平成18年度一般度研究開発助成 AF-2006024)

キーワード：電磁成形，平板状コイル，金属薄板

1. 研究の目的と背景

電磁成形法は，アルミニウムや銅など高導電率の金属材料に高密度磁束を急激に加えて渦電流を誘起させ，生じた電磁力とジュール熱によって成形する技術である．高速度加工法であり，パンチを必要としない．高密度磁束はパルス大電流を成形用コイルに流して生成され，金属管の成形には円筒形のソレノイドコイルが，金属薄板の成形には平板形のスパイラルコイルが主に使われてきた¹⁾．薄板の成形では，荷重変換器による電磁力の測定²⁾および磁束集中器を用いた成形が報告されている³⁾．また，衝撃圧力を受ける周辺固定円板について，数値解析により変形過程や曲げ応力波の作用が示されている⁴⁾．

成形用コイルは大きな機械的強度を持ち，一様な張出し力を生成できる形状が望ましい．パルス大電流が流れると，コイル巻線と金属薄板間およびコイル巻線間には大きな電磁力を受け，同時にコイルは加熱される．従来，金属薄板の成形には平板形のスパイラルコイルが用いられたが，平角銅線を蚊取り線香状に巻いた構造なので，電磁力を受けて変形・損傷しやすい問題があった．この影響を緩和するためにパルス大電流を低めに設定すれば，電磁力が低下して張出し量は小さくなる．また，スパイラルコイル上面の磁束密度は中央部で低くて一様分布でないため，金属薄板を張り出す電磁力分布も一様でなくなる欠点もある．この解決のために，二つのスパイラルコイルを並列配置する方法が研究されている⁵⁾．

都立高専の相沢によって考案された平板状ワンターンコイル⁶⁾は大きな機械的強度を持つので，大きなパルス大電流実験が可能である．本研究の目的は次の通りである．(1)アルミニウム薄板の電磁自由張出し実験から，成形形状，成形高さおよび板厚分布などの基礎資料を得る．(2)電磁成形が困難であった低導電率の SUS304-O ステンレス薄鋼板を，微細凹形状に張出し成形できることを示す．そして，近似したコイル電流分布から薄板表面の磁束密度や電磁力分布を検討し，成形品のしわと反りの抑制効果を明らかにする．(3)平板状2ターンコイルを作成し，金型の溝底面までの成形を実現する．

2. 電磁成形原理

金属薄板，一枚の銅合金板で作られた平板状ワンターンコイル中央断面および電流と磁束を図1に示す．パルス大電流（コイル電流）は狭められたコイル中央部で集

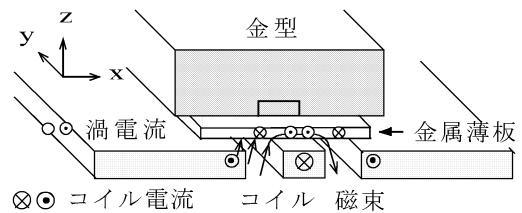


図1 コイル電流，渦電流および磁束（電流に垂直な断面）

中し，高密度電流として長手方向（y方向）に流れる．この電流に比例する高密度磁束がコイル中央部の周囲に発生し，上面に置かれた金属薄板に交差する．磁束 Φ の交差によって，薄板内に式(1)の電圧 V が誘導される．

$$V = -d\Phi/dt \quad (1)$$

導電率に比例する渦電流がコイル電流と逆方向に流れ，交差した磁束 Φ とによって大きな電磁力（反発力）が薄板に発生し，薄板を高速度で金型の凹溝内に張り出す．同時に渦電流によるジュール熱は薄板自身を加熱する．式(1)から，磁束の変化率が大きいほど，誘導電圧は大きくなる．高導電率の薄板では，渦電流が大きくなって大きな電磁力が発生するので，成形高さは大きくなる．

3. 平板状ワンターンコイルと実験装置

実験装置の概略を図2に示す．図2(a)で，コイル L は，クロム銅の一枚板から作成されたE形の平板状ワンターンコイルである．コイルの外寸法は $(270\sim 390) \times 145 \times 1.0\text{mm}$ で，二つの隙間 d を挟んで，中央部と周辺部に分けられている．中央のコイル長さ a は $130\sim 250\text{mm}$ ，中央のコイル幅 b は 20mm である．中央部で成形を行うので，金型成形部の大きさによって a および b は決定される．コイル上面に置かれる金属薄板と金型は，コイルと一緒に締付け金具で固定され，コイルと薄板間および薄板と金型間は 0.1mm 厚および 0.05mm 厚のポリイミドフィルムで絶縁および隔離される．図2(b)のコンデンサ電源 C —放電ギャップスイッチ G —コイル L は放電回路を構成していて，電源容量は $100, 200\mu\text{F}$ である．

コイル電流は，隙間両側の周辺部からコイル幅 b 内に集中して流れる．放電回路のインダクタンスはコイル長さ a で異なり，電流波形から計算された回路インダクタンスは $0.059, 0.07\mu\text{H}$ ，コイルのインダクタンスは $0.029, 0.04\mu\text{H}$ である．回路の周波数は $44, 51\text{kHz}$ である．

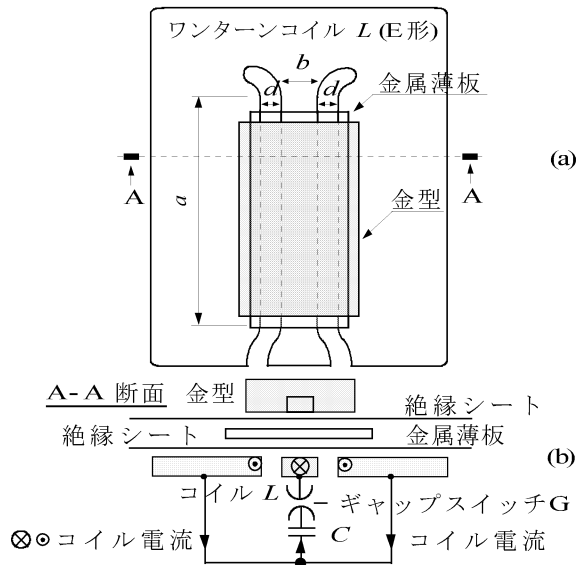


図2 装置の概要：(a) 平面図，(b) 断面図と放電回路

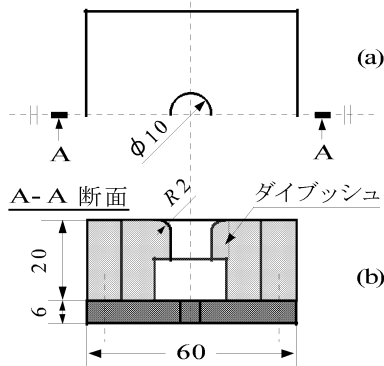


図3 金型：(a) 平面図，(b) 断面図

4. アルミニウム薄板の電磁自由張出し⁷⁾

4.1 金型と材料特性

自由張出し実験に用いた金型は、市販のダイブッシュを平板に埋め込んで作成された。金型を図3に示す。材質はともにSK材で、ダイブッシュは焼き入れされている。丸穴の直径 ϕ は10mmで、肩半径 R は2mmである。

金属薄板はアルミニウム材(A1050-H24)を用いた。板厚は0.5mmである。引張速度10mm/minで、引張強さは130MPa、伸び率は5%であった。標準軟銅の導電率を100%としたパーセント導電率は、58%である。

4.2 金属薄板の取り付けとコイル電流

成形に用いたE型の平板状ワタールコイルの寸法は、中央の直線部長さは250mm、中央の板幅(コイル幅)は20mm、厚さは1.5mmである。電源容量は100 μ Fである。E型平板コイルの上に金属薄板を置き、金型を置いて、全体を締め付け金具で固定した。締め付けトルクは20N \cdot mとした。金属薄板は、その圧延方向をコイル電流が流れる方向に合わせて置かれた。金型の穴径(ϕ 10mm)と肩半径(R 2mm)による成形領域は14mmで、コイル幅20mmの70%になった。放電エネルギー3.0kJの場合の

放電電流を図4に示す。放電電流は、流れ始めから約3.3 μ sで最大値250kAに達し、振動しながら減衰した。振動周期は約15.4 μ s、流れた時間は約45 μ sである。放電回路の全インダクタンスは約0.059 μ Hであった。

4.3 成形形状と成形高さ

成形形状を図5に示す。すべての放電エネルギーでほぼ軸対称であった。図5(a)の1.0kJで、軸近傍で突出するように変形したが、放電エネルギーを高くすると、ほぼ円錐形状になった。クラックや引込みしわは4.0kJまで生じなかった。しかし、金型肩部と接している薄板部に肌荒れが生じていた。

成形高さや放電エネルギーの関係を図6に示す。放電エネルギーを高くすると、成形高さは大きくなった。4.0kJで4.5mmと大きく、引込みしわやクラックも見あたらなかった。板厚0.3mmの ϕ 12mm、 R 2mmへの自由張出しで、最大6mmの成形高さを得ている。A1050-H24薄板は、比較的電磁張出し成形に適した材料である。

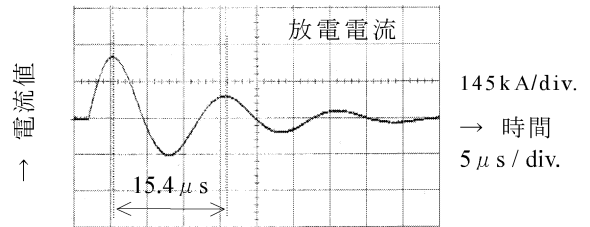


図4 放電電流 (3.0 kJ)

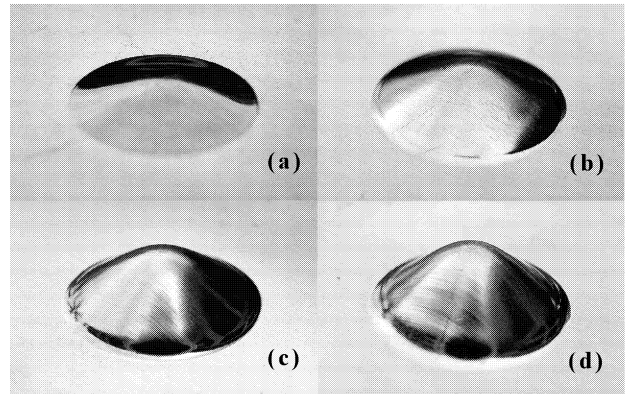


図5 成形形状：(a) 1.0 kJ, (b) 2.0kJ, (c) 3.0kJ, (d) 4.0kJ

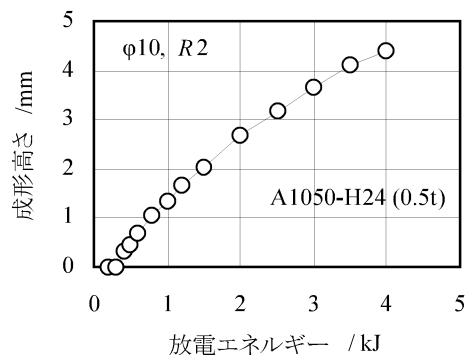


図6 成形高さや放電エネルギーの関係

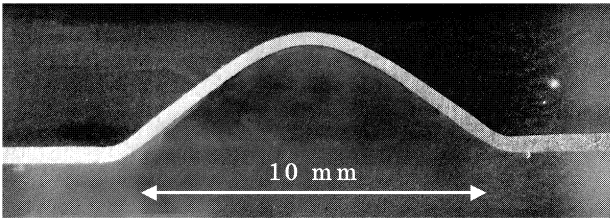


図7 コイル電流方向 (RD 方向) の切断面 (A1050-H24, 0.5 t, 3.0 kJ)

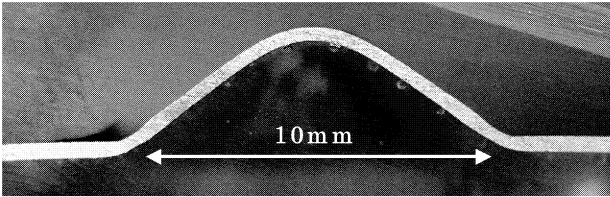


図8 コイル電流に直角方向 (TD 方向) の切断面 (A1050-H24, 0.5 t, 3.0)

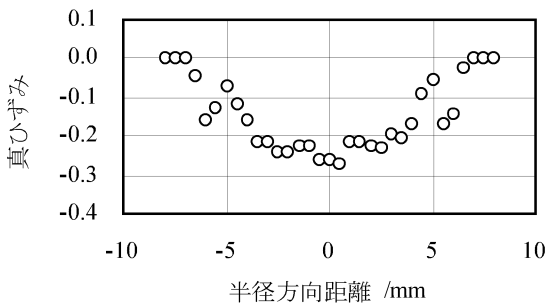


図9 真ひずみの半径方向分布 (図7, RD 方向)

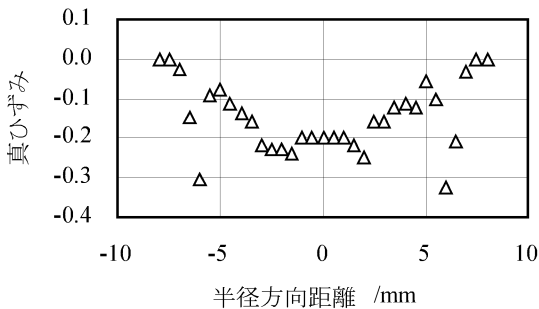


図10 真ひずみの半径方向分布 (図8, TD 方向)

4.4 板厚ひずみ

成形された試料について、コイル電流方向の切断面を図7に、垂直方向の切断面を図8に示す。放電エネルギーは3.0 kJである。クラックは生じていない。これらの切断面を拡大して、半径方向の板厚を測定し、真ひずみを求めた。図7, 図8のひずみ分布を図9と図10に示す。板厚は、14mmの成形領域内で減少し、その外側で変わらなかった。E型平板コイルを用いた電磁自由張出しは、金型の成形領域にある薄板部分で、張り出される。板厚は、各々の切断面の中心軸に対して、ほぼ対称であった。板厚の減少は、頂点付近および肩部で多かった。図10

で、肩部における板厚の減少は、薄板の圧延方向の影響および引張力(電磁力)の作用などが考えられる。

5. ステンレス薄鋼板の電磁張出し成形^{8), 9)}

5.1 圧力伝達板(ドライバー)と金型

ステンレスは耐食性に優れているので、燃料電池用金属セパレータ材やそのコア材に用いられる。成形品には密閉性を高めるための平面度が要求されるが、プレス張出し成形ではしわなどが生じ易く、抑制技術が検討されている¹⁰⁾。

アルミニウムに比べ、ステンレスの導電率は約4%なので渦電流は小さく生じる電磁力も小さくなる。また、引張強さが大きいので、電磁張出し成形するにはより大きな電磁力を必要とする。図2の金属薄板をステンレス薄鋼板に変えても成形は不可能である。図11のように、ドライバーとしてコイル上面に高導電率のアルミニウム薄板(A1050-H24)を置き、生じた電磁力を伝達してステンレス薄鋼板(SUS304-O)を成形した⁸⁾。供試材の板厚、0.2%耐力および伸び率は、SUS304-O薄鋼板は0.15 mm, 350 MPaおよび54%であり、A1050-H24ドライバーは0.3 mm, 115 MPaおよび5.2%である。

金型は焼き入れされたSK材に、燃料電池用金属セパレータ¹¹⁾を参考にして図12の形状に製作された。成形部の大きさは12×60 mmで、曲がりくねった微細凹形状である。長手方向をコイルの長手方向に合わせて置くので、成形部はコイル幅(20 mm)の60%内になる。基本形状寸法を図13に示す。表面部、底面部分の間隔および

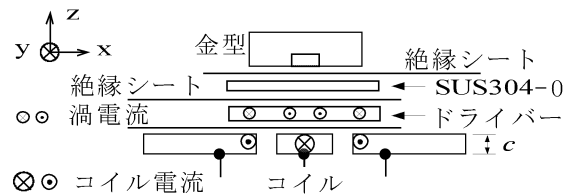


図11 ドライバーを用いたSUS304-Oの電磁張出し成形

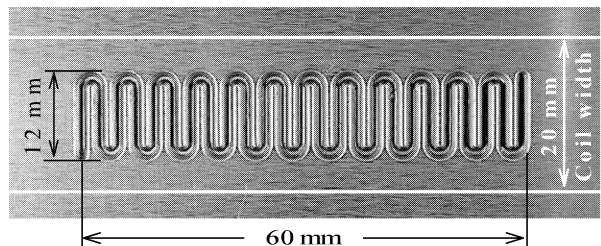


図12 微細凹形状の金型

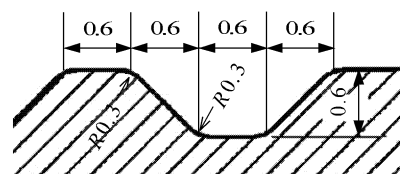


図13 金型の基本形状(肩 R0.3)

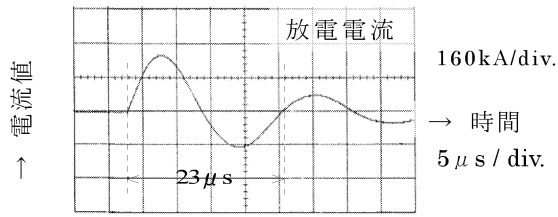


図 14 放電電流 (4.0 kJ)

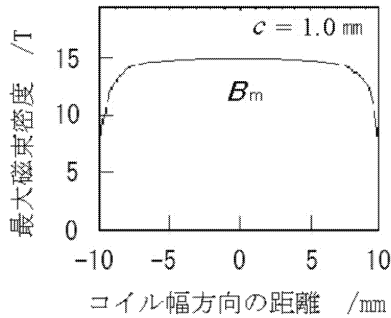


図 15 コイル幅方向の磁束密度分布 (260 kA, 4.0 kJ)

溝深さは 0.6 mm, 角部半径は 0.3 mm である。

5.2 コイル電流と磁気圧力

コイルに流れる放電電流をサーチコイルで検出し、積分器を通してオシロスコープで観測した。電源容量は 200 μ F である。放電エネルギー 4.0 kJ における放電電流を図 14 に示す。振動減衰し、最大値は約 260 kA, 周期は約 23 μ s, 流れた時間は約 50 μ s であった。A1050-H24 ドライバーに対する表皮深さは約 0.41 mm となる。コイル電流に比例する磁束密度は、x 方向成分 B_x と z 方向成分 B_z を持つ。最大値 260 kA に対し、張出し力に関する磁束密度 $B_1 \approx 2 B_x$ の最大値 B_m を図 15 に示す。コイル幅 b の 80% 内でほぼ一定で、約 15 T になる。磁束密度 B_1 を用いて、単位体積あたりの張出し力に等価なドライバー両面の磁気圧力差 P は式(2)で求められる¹²⁾。

$$P = B_1^2 / 2\mu \{1 - \exp(-2\tau / \delta)\} \quad (2)$$

τ はドライバーの厚さ、 δ は表皮深さである。最大磁束密度 15 T で発生する最大磁気圧力は約 70 MPa である。

5.3 成形高さと成形形状

図 16 に成形高さを示す。それぞれの放電エネルギーで 3 回の測定を行い、その平均値を成形高さとした。測定値のばらつきは絶対値で 5% 未満であった。A1050-H24 ドライバーのみの成形結果では、2.5 kJ の低放電エネルギーで成形高さ 0.58 mm に達し、ドライバーに生じる大きな磁気圧力を確認できた。SUS304-O 薄鋼板の成形高さは直線状に大きくなったが、最大の成形高さは 0.43 mm と小さく、溝深さ 0.6 mm に達しなかった。現在の装置は平板状ワンターンコイルの電気絶縁性確保のために、放電エネルギーは 4.5 kJ に制限されている。この制限を緩和できれば、溝深さ 0.6 mm に近い成形高さを得ることが可能になる。

放電エネルギー 4.5 kJ で成形した SUS304-O 薄鋼板の外観を図 17 に示す。薄鋼板は金型成形部全面にわたって張り出されている。図 17 の口部分を拡大した図 18 で、目視による引込みしわやひずみ模様は見あらず、成形部に亀裂は発生していない。また、図 19 に示されるように、SUS304-O 薄鋼板に反りはほとんど見られない。

5.4 磁束密度と電磁力分布

SUS304-O 薄鋼板を成形できた理由は、スパイラルコイル⁵⁾ の約 2.5 倍のパルス大電流を流せたこと、および A1050-H24 ドライバーに生じた電磁力分布による。

電磁力を生成する磁束密度の高さや分布形状は、コイルの幅、厚さおよびコイル電流の大きさ、電流密度分布によって違ってくる。コイル電流密度と渦電流密度を仮定すると、正規化された電磁力分布¹³⁾ は図 20 で示される。ドライバーに生じる電磁力分布は磁束密度分布と等

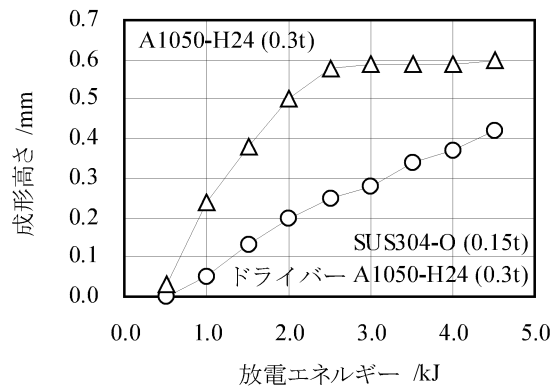


図 16 成形高さと放電エネルギーの関係

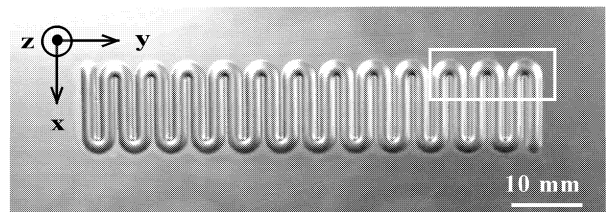


図 17 SUS304-O の成形形状 (平面図)

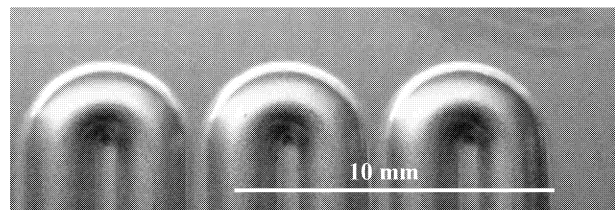


図 18 拡大図 (図 17 の口部)

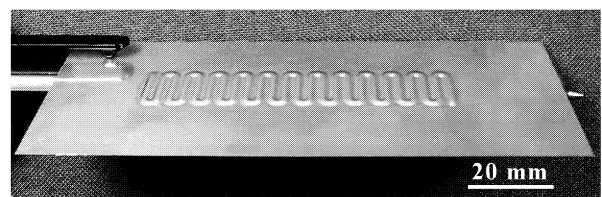


図 19 SUS304-O の成形全体図 (斜視図)

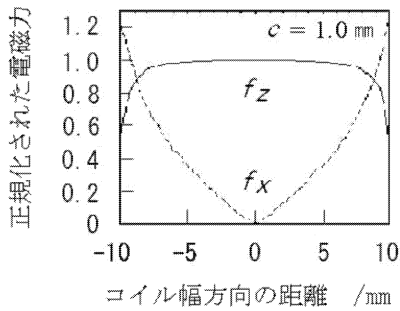


図 20 正規化された電磁力分布
(張出し力 f_z と引張り力 f_x)

しくなる。張出し力 f_z はコイル幅中心で最大になり、コイル幅の 80 % 内においてほぼ等しい。引張り力 f_x はコイル幅中心で零であり、コイルの両側で最大になる。この二つの力はドライバー内に生じていて、コイル長手方向 (y 方向) に一様に分布している。

5.5 しわと反りの抑制および爆発成形の変形機構⁹⁾

しわと反りを抑制できた理由は二つあり、一つは平板状ワンターンコイルの特質である。成形幅がコイル幅の 80 % 内にあれば、コイル電流が流れている時間、図 21 で金型の成形部表面に接触している二枚の金属薄板は、表面の幅が狭くても板押え力として作用する金型方向 (z 方向) の電磁力とその反力によって表面に固着される。同様の作用によって、非成形部の薄板も金型表面に固着される。従って、成形部への材料流入は抑制される。

しわと反りを抑制できたもう一つの理由は、高エネルギー速度成形法の特質にあると考えられる。爆発成形の数値解析⁴⁾によると、浅い球面凹型への成形で、周辺固定円板に等分布衝撃圧力が加えられると、固定されている素板外周部から中央に曲げ応力波が移動する。波の移動によって、素板は傾斜面を形成しながら成形高さを増していく。この変形過程の途中で型と衝突するが、衝突した素板斜面部と周辺固定部にある素板は運動エネルギーを有しないので、以後の変形を生じない。素板中心部は運動エネルギーを有しているの、型との密着はしだいに中心方向に進展する。

平板状ワンターンコイルを用いた電磁張出し成形では、成形部で金型表面に接触している金属薄板および非成形部の薄板は張出し力に等しい板押え力を受けて金型表面に固着される。型溝部に位置する金属薄板は等分

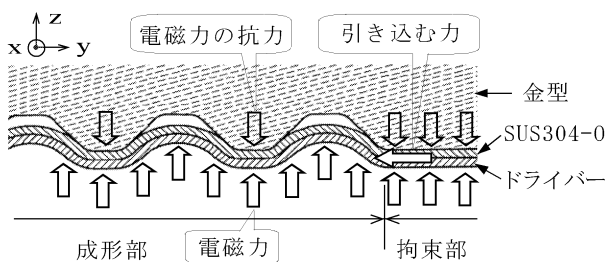


図 21 電磁力の作用

布の張出し力によって張り出され、金型斜面部に衝突しながら成形高さを増していくと考えられる。金型方向の大きな電磁力と高エネルギー速度成形法の特質によって、SUS304-O 薄鋼板のしわと反りは抑制される。

6. 平板状 2 ターンコイルによる電磁張出し成形^{14), 15)}

6.1 平板状 2 ターンコイル

平板状ワンターンコイルを用いると、金属薄板を微細凹形状に張出し成形することが可能になり、しわと反りの少ない成形品が得られる⁸⁾。成形高さを大きくするには、放電エネルギーを高くする、もしくはコンデンサからコイルへの放電エネルギーの移送効率¹²⁾を高めればよい。平板状 2 ターンコイルを用いるとコイルインダクタンスが大きくなり、移送効率が高くなる。0.3 mm 厚の A1050-H24 薄板を成形面積 60×40 mm² に電磁張出しした実験では、約 3 倍の成形高さが得られている¹⁴⁾。

平板状 2 ターンコイルの模式図と電流の方向 (⇨) を図 22 に示す。上下両板は直列に接続されて 2 ターンとなっており、コイル中央部分には集中した同じ方向の電流が流れる。二つのコイル中央部で生成された磁束は、加わって金属薄板に交差する。SUS304-O 薄鋼板の成形実験は、図 11 のワンターンコイルを 2 ターンコイルに変えて行われた。電源容量は 100 μF である。全インダクタンスは約 0.111 μH、コイルのインダクタンスは約 0.081 μH である。回路の周波数は約 47 kHz である。

6.2 実験方法

成形実験は図 12 の微細凹形状の金型を用いた。金型の長手方向をコイル中央部分の長手方向 (電流方向) に合わせて置いた。成形部分の幅 12mm はコイル幅 (20, 22mm) の約 60% なので、成形部とその周辺には等しい張出し力が作用する。供試材 SUS304-O の板厚は 0.1mm、ドライバーは二種類で、A1050-H24 は 0.3mm、C1100 は 0.15~0.3mm である。C1100 の表皮深さは 0.29 mm である。A1050-H24 ドライバーによる成形実験で得られた成形品は、図 13 の溝底面との圧痕が明確でなかった。金型の外側に位置しているドライバーが 5.0 kJ で溶融していたことから、成形部分で軟化し、SUS304-O 薄鋼板に十分な圧力を伝達できなかったためと考えられる。そこで、融点が高くより高導電率の銅 C1100 薄板をドライバーに用いて、張出し形状の改善を図った。

6.3 ドライバー厚の影響と成形高さ

C1100 ドライバーの板厚が成形高さに及ぼす影響を図

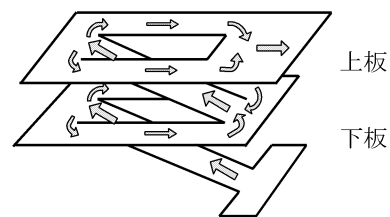


図 22 平板状 2 ターンコイルと電流方向

23 に示す。0.2mm 厚が最も大きい、0.15mm 厚もほぼ同じ高さであった。表皮深さに近い 0.3mm 厚が小さい理由は、0.2mm 厚よりも引張荷重が大きく、同じ高さを張り出すのにより大きな電磁力を要するからである。

図 24 で、0.2 mm 厚の C1100 ドライバーのみの成形高さは、放電エネルギー 2.5 kJ で 0.59 mm に達し、2.5 kJ を超えても同じであった。SUS304-O 薄鋼板の成形高さは 4.0 kJ で 0.59 mm に達し、5.0 kJ まで同じであった。SUS304-O 薄鋼板を微細成形する場合、銅 C1100 薄板はドライバーに適している。

6.4 成形形状

図 25 に放電エネルギー 5.0 kJ で得られた成形品の概観を示す。目視で、図 13 の溝底面に押圧された約 0.4 mm 幅の痕跡が、図 12 に沿う形状で、連続的に確認された。成形品に引込みしわやひずみ模様は無く、成形部に亀裂は発生していない。しかし、僅かな反りが見られた。

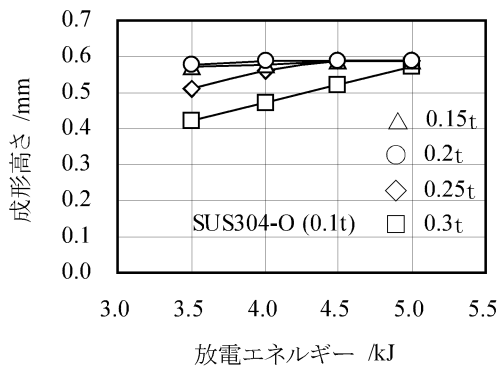


図 23 成形高さに及ぼす C1100 ドライバー厚の影響

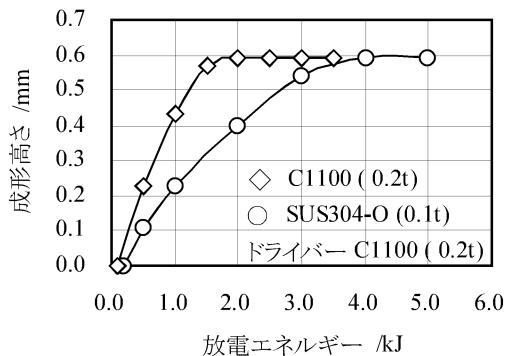


図 24 成形高さとの放電エネルギーの関係

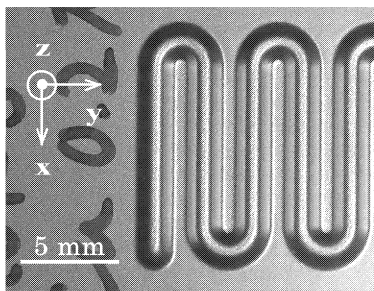


図 25 SUS304-O の成形形状

7. 結言

- (1) 平板状 2 ターンコイルを用いた大気中の実験で、引込みしわが無く型溝の底面に達する、微細凹形状の成形品を得た。A1050-H24 アルミニウム薄板、C1100 銅薄板および SUS304-O 薄鋼板の張出し成形が可能である。また、A1050-H24 薄板は比較的に大きな成形高さが得られ、電磁張出し成形に適した材料である。
- (2) 引込みしわが無く、反りの少ない成形品が得られた理由は、金型方向の大きな電磁力が成形部と非成形部で効果的に作用したこと、および高エネルギー速度成形法の特質によると考えられる。
- (3) 平板状のコイルは、コイル幅の約 80 % 内で同じ大きさの大きな張出し力およびコイル幅の中点から両端への引張り力を金属薄板に生成できる。成形幅は狭いが、コイル長さ（直線部長さ）に近い張出し成形が可能であり、成形長さの制限は少ない。

謝 辞

本研究にご支援をして下された「天田金属加工機械技術振興財団」に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，(2006)，802-803，コロナ社。
- 2) 高橋正春・村越庸一・寺崎正好・佐野利男・松野健一：機技研報告，40-6 (1986)，277-283。
- 3) 根岸秀明・鈴木秀雄・前田禎三：塑性と加工，18-192 (1977)，16-21。
- 4) 藤田昌大・石氷泰夫・持原稔・苧阪浩男・張芮・井山裕文：塑性と加工，38-435 (1997)，331-336。
- 5) D.A. Oliveira, M.J. Worswick, M. Finn, D. Newman : Materials Processing Technology, 170 (2005), 350-362。
- 6) 特許第 3751153 号，(2005)
- 7) 岡川啓悟・相沢友勝・松澤和夫・廣井徹磨：57 回塑加連講論，No.413 (2006)，115-116。
- 8) 相沢友勝・岡川啓悟・宮崎裕明・下条拓人・稲子博之：平 18 塑加春講論，No.607 (2006)，191-192。
- 9) 岡川啓悟・相沢友勝・松澤和夫・廣井徹磨・宮崎裕明：塑性と加工，49-565 (2008)，158-162。
- 10) 浅川洋平・中川和彦・清藤雅弘・上野恵尉：57 回塑加連講論，No.602 (2006)，155-156。
- 11) 公開特許公報：特開 2003-142119，(2003)。
- 12) 日本塑性加工学会編：高エネルギー速度加工，(1993)，163-167，コロナ社。
- 13) 岡川啓悟・松澤和夫・相沢友勝：平 18 塑加春講論，No.605 (2006)，187-188。
- 14) 相沢友勝・岡川啓悟・宮崎裕明・下条拓人・稲子博之：57 回塑加連講論，No.416 (2006)，121-122。
- 15) 岡川啓悟・相沢友勝・廣井徹磨・石橋正基・広橋光治：平 21 塑加春講論，No.408 (2009)，183-184。