論文

加圧箔を用いる金属箔の電磁穴あけ加工

岡川 啓悟* 石橋 正基*

廣井 徹磨* 坂本 誠* 長谷川 収*

Electromagnetic Piercing of Metal Foil Using Pressurization Foil

Keigo OKAGAWA*, Masaki ISHIBASHI*,

Tetsumaro HIROI*, Makoto SAKAMOTO* and Osamu HASEGAWA*

(Received on May 1, 2018)

The need for minute processing is increasing recently, and electromagnetic piercing is again attracting attention. The electromagnetic piercing of metal foils theoretically does not need a punch and is performed using only a die. In this paper, we describe the piercing of both aluminum foil and stainless-steel foil using pressurization foil. The electromagnetic force generated in the aluminum foil is calculated with magnetic pressure and is proportional to the square of the diameter of the die hole. Therefore the piercing for a small hole of less than 1.0 mm diameter needs a high discharge energy. In experiments, the piercing of only a 15 μm -thick aluminum foil is impossible because the magnetic pressure is too low or the foil melts with softening, and the piercing of only a 50 μm -thick aluminum foil is also difficult. If a pressurization foil of 50 μm thick or 100 μm thick is added, a good piercing of these foils is enabled for holes from 0.5 to 2.5 mm diameter. The piercing of a 20 μm -thick stainless-steel foil is enabled by using a similar pressurization foil. However, a section of the pierced foil has both a sheared surface and a fractured surface.

Key words: electromagnetic piercing, aluminum foil, stainless-steel foil, pressurization foil, magnetic pressure, die, flat-plate one-turn coil, discharge energy.

1. 緒言

パソコンなどの小型電子機器および産業用や医療用のマイクロポンプ¹⁾など、加工製品の軽薄短小化が進み、微細形状の穴あけ加工技術が重要になっている。一般に、パンチとダイのクリアランスは、被加工材の厚さの10%未満である²⁾。そのため、0.2 mm厚以下の金属箔の微細穴あけ加工では、クリアランスの正確な設定は、軸対称の丸穴形状でも難しい。この解決法として、ゼロクリアランス金型による精密せん断加工法³⁾、およびナノ精度デジタルクリアランス調整による金属箔打抜き技術⁴⁾が開発されている。複数穴や複雑形状穴の微細穴あけ加工では、クリアランスの正確な設定はさらに難しいと思われる。この解決法として、レーザー加工パンチによる複数形状一括せん断加工法が開発されている⁵⁾。しかし、加工技術の難しさや費用などの課題があるため、ダイのみを使用する衝撃加工法も再検討されている。

衝撃加工法は、原理的にパンチレスである。クリアランスの設定が不要のため、複雑な異形状穴の加工に適すると考えられ、電磁穴あけ加工^{5)~7)}および衝撃液圧加工^{8)~10)}

がある。電磁穴あけは、パンチレスの電磁力加工法である。電磁力によって高速変形された金属薄板や金属箔は、ダイ穴円周部の切れ刃で穴あけされる。多数穴を持つダイと1枚板で作製される平板状ワンターンコイルを用いると、多数穴の同時加工が可能である^{5)~7)}。

電磁力は、渦電流が流れる金属薄板内や金属箔内に生じる。渦電流は材料の導電率に比例する。高導電率のアルミニウム箔などの電磁穴あけでは、渦電流により、熱容量の小さい金属箔は温度上昇し、変質して溶融することもある。溶融は金属箔の箔厚やダイの穴径に関係すると思われるが、詳細は明らかでない。一方、低導電率のステンレス箔の電磁穴あけでは、渦電流が非常に小さいため、電磁力はほとんど生成されない。そのため、ステンレス箔がほとんど変形せず¹¹⁾、穴あけはできない。高導電率箔の溶融防止および低導電率箔の穴あけのため、加圧箔を用いられるが、金属箔厚と適切な加圧箔厚の関係などが明らかでない。

本論文では、アルミニウム箔について、原理式から、箔厚と磁気圧力の関係およびダイの穴径と電磁力の関係を調べ、電磁穴あけにおける箔厚と穴径の影響を明らかにする。そして、電磁穴あけ実験から、円形穴あけの可否およびアルミニウム箔の溶融状況を調べるとともに、加圧箔の必要性和効果を検証する。また、加圧箔を用いるステンレス箔の円形穴あけの可否などについて述べる。

* 東京都立産業技術高等専門学校ものづくり工学科 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40
Monozukuri Department, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan.
E-mail: okagawa@s.metro-cit.ac.jp

2. 金属箔の電磁穴あけ原理と放電電流の測定

金属箔の電磁穴あけ断面を Fig. 1 に示す. 金属箔は高導電率材である. コイル電流 (放電電流) I は隙間両側の周辺部 (⊙) から細長い中央部 (⊗) に集中して流れる. コイル中央部の電流密度は高くなり, y 方向に沿って高密度磁束 ϕ を生成する. ϕ が交差したコイル中央部上方の金属箔内に, 磁束の浸透を妨げるように, 渦電流 i (⊙) がコイル電流 (⊗) と逆方向に流れる. 渦電流と磁束により, 金属箔内に電磁力 f が生じる. なお, 渦電流 i (⊙) による磁束は示されていない. また, ダイの穴形状は円形である.

電磁力 f により, ダイ円形穴に位置する金属箔が円錐状に高速変形しながら高さを増す¹²⁾ ため, ダイ円周部近傍の金属箔は切れ刃に押し付けられ, せん断される.

Fig. 1 Discharge current, eddy currents, and magnetic flux lines (Metal foil bulges in the direction of die by electromagnetic force)

ファラデーの法則, オーム則およびフレミングの左手則より, 金属箔の渦電流密度 i , 単位体積あたりの電磁力 f は式(1)および式(2)で与えられる.

$$\text{rot } i = -\kappa (\partial B / \partial t) \quad (1)$$

$$f = i \times B \quad (2)$$

κ と B は金属箔の導電率と磁束密度である. 金属箔に生じる電磁力 f の算出は難しいが, Fig. 1 の z 方向成分の電磁力と等価な磁気圧力 P は, Fig. 2 に示される金属箔のコイル側の表面磁束密度 B_1 とダイ側の表面磁束密度 B_2 を用いて算出される^{11)~13)}. B_1 は, 放電電流 I による磁束 ϕ_1 と渦電流 i による磁束 ϕ_i の和の面密度である. B_1 は金属箔内で減衰する. ダイ側の表面磁束密度 B_2 は, B_1 を用いて式(3)で求められる.

Fig. 2 Magnetic flux densities on both surfaces of metal foil

$$B_2 = B_1 e^{-(\tau/\delta)} \quad (3)$$

τ と δ は, 金属箔の厚さと表皮深さである. 表皮の深さ δ は, 式(4)で表される.

$$\delta = (2/\omega\mu\kappa)^{1/2} = (T/\pi\mu\kappa)^{1/2} \quad (4)$$

T は放電電流 I の周期, μ は金属箔の透磁率である. δ は, 放電回路の周期 T および材料特性値 μ と κ で定められる.

Fig. 2 の金属箔に加わる磁気圧力 P は, 金属箔両面の磁気圧力差であり, 式(5)で求められる.

$$P = B_1^2/2\mu - B_2^2/2\mu \\ = B_1^2 \times \{1 - e^{(-2\tau/\delta)}\} / 2\mu \quad (5)$$

箔厚 τ が有限の P は, B_1 , δ と τ を与えると数値で求められる. τ が無限大で, $e^{(-2\tau/\delta)} = 0$ であるため, 式(5)の磁気圧力 P は第 1 項のみになり, $P = B_1^2/2\mu$ で最大になる.

表皮深さ δ は, 金属箔がアルミニウム, T が $10 \mu\text{s}$ で, $\delta \approx 280 \mu\text{m}$ である. 箔厚 τ が $150 \mu\text{m}$ 以下のため, 金属箔を通過する磁束が存在する. 通過磁束は τ が小さいほど多い.

放電電流は, Fig. 1 に示される市販のロゴスキーコイルで検出され, 積分器を通してオシロスコープに記録される.

3. 電磁穴あけ原理式の数値的検討¹³⁾

実験に際し, 外力に相当する磁気圧力や電磁力と材料の厚さや穴径との関係がおおよそ分かっているならば, 能率的な実験が可能になり, かつ実験結果の考察が容易になる.

3.1 磁気圧力とアルミニウム材の厚さの関係

放電電流 I による磁束 ϕ_1 に関し, コイル側の表面磁束密度 $B_1 = \mu H_1$ は, 文献 11) に示される (磁束密度 B_1 / 放電電流 I) に I を代入して求められる. アンペアの周回積分則から, 磁束密度 $B = B(t)$ は放電電流 $I = I(t)$ に比例する.

渦電流 i による磁束 ϕ_i に関し, コイル側の表面磁束密度 B_i は放電電流 I と箔厚 τ によって変わる. B_i は, τ が無限大で放電電流 I による B_1 に等しく最大であり, τ が零すなわち金属箔が無ければ零である.

Fig. 2 で, コイル側の表面磁束密度 B_1 は B_1 と B_i の和である. 箔厚 τ が有限の B_1 は, τ に関する上述の 2 条件を満たす構成式で計算された B_i を用い, $B_1 = B_1 + B_i$ で求められる. 厚さ τ が無限大で $(B_1)_\infty = B_{1\infty} = 2B_1$ で最大であり, 厚さが零で $(B_1)_0 = B_{10} = B_1$ で最小である.

箔厚 τ における B_1 と P を数値で検討する. B_1 と P は放電電流 $I = I(t)$ と箔厚 τ の関数である. 任意の $I(t)$ で, B_1 と P は τ が無限大で最大になる. そこで, 箔厚 τ における B_1 と P を, $\tau = \infty$ の $B_{1\infty}$ および P_∞ で無次元化し, 磁束密度比 $B_1/B_{1\infty}$ および磁気圧力比 P/P_∞ で検討する.

計算に用いる数値は, アルミニウム材の導電率 κ と透磁率 μ , 放電電流 I の最大値 $I_m = 100 \text{ kA}$, 周期 T は約 $10 \mu\text{s}$ である. 磁束密度比 $B_1/B_{1\infty}$ と磁気圧力比 P/P_∞ に及ぼす金属板の厚さ τ の影響を Fig. 3 に示す. $B_{1\infty} = 17.3 \text{ T}$, $P_\infty = 119 \text{ MPa}$ である. ●と▲は, 箔厚 τ が表皮深さ $\delta \approx 280 \mu\text{m}$ に等しい場合の値である. ○と△は箔厚 $15, 50, 100, 150 \mu\text{m}$ の値である. $\tau = 0$ は金属箔が無い場合で, $B_1/B_{1\infty} = 0.5$ であ

Fig. 3 Relationship between ratio of flux density or ratio of magnetic pressure and thickness of foil

る. $\tau < \delta$ で, $B_1/B_{1\infty}$ と P/P_∞ は低くなる. P が B_1^2 に比例するため, P/P_∞ の低下は顕著である. $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚と $15\text{ }\mu\text{m}$ 厚の P/P_∞ は, 磁気圧力 P_∞ の 9.9% と 2.7% で非常に低い.

$0.5 < B_1/B_{1\infty} < 1$ のため, B_1 は金属箔のコイル側表面で常に存在する. したがって, 箔厚が小さい導電性の金属箔に, 式(1)に従う渦電流が流れ, 金属箔は温度上昇する.

3.2 電磁力とダイ穴径の関係

金属箔に加わる磁気圧力 $P[\text{N}\cdot\text{m}^{-2}]$ はコイル幅 b 内ではほぼ等しいが, ダイ穴上の金属箔に生じる z 方向電磁力 $F[\text{N}]$ は, 穴径 $d_h[\text{m}]$ で異なる. $I_m=100\text{ kA}$ の Fig. 3 の P を用い, d_h 上の金属箔の z 方向電磁力 $F[\text{N}]$ を式(6)で算出する.

$$F = P \cdot S = P \cdot \pi d_h^2 / 4 \quad (6)$$

S はダイ穴面積である. F は d_h の 2 乗に比例する. ダイ穴部の金属箔に生じる z 方向の電磁力の比 $F/F_{2.5}$ を Fig. 4 に示す. $F_{2.5}$ は $d_h=2.5\text{ mm}$ の電磁力である. 箔厚 $\tau=100\text{ }\mu\text{m}$ で $F_{2.5}=124\text{ N}$ になる. $F/F_{2.5}$ はすべての箔厚 τ で等しく, 1 本の曲線で表される. $F/F_{2.5}$ はダイ穴径 d_h が 1.0 mm で 16%, d_h が 0.5 mm で 4% であり, d_h の 2 乗に比例して減少する. 穴径 $d_h < 1.0\text{ mm}$ の電磁穴あけは, 大きな電磁力を生じる高い放電エネルギーが必要であるが, 熔融を伴うために難しい. 一方, $d_h > 2.5\text{ mm}$ の穴あけは, $F/F_{2.5}$ が d_h の 2 乗に比例するため, 比較的容易と考えられる.

Fig. 4 Relationship between ratio of electromagnetic force and diameter of die hole

4. 実験装置とダイ^{13), 14)}

コイル平面と放電回路を含む実験装置の断面を Fig. 5 に示す. Fig. 5(a)は, コイル上面に加圧箔, 金属箔 (アルミニウム箔) およびダイを取り付けた概略平面図である. コイル L は, クロム銅の一枚板で作製された E 形の平板状ワターンコイルである. コイルは, 二つの隙間 g を挟んで中央部と周辺部に分けられる. 中央のコイル幅 b は 4 mm , 厚さ c は 3 mm , y 方向直線部 a は 80 mm である. 穴あけは細長い中央直線部の上方で行われる. コイル上面に置かれる加圧箔, アルミニウム箔およびダイは, Fig. 5(b)に示されるコイルおよび固定具と一緒に締付け金具で固定される.

アルミニウム箔および加圧箔は IN30 アルミニウム軟質箔および硬質箔で, 箔厚は $15, 50, 100$ および $150\text{ }\mu\text{m}$ である. コイルと加圧箔間およびダイと固定具間は 0.1 mm 厚のポリイミドフィルム, 加圧箔とアルミニウム箔間は $25\text{ }\mu\text{m}$ 厚のテフロンフィルムで電氣的に絶縁される.

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, コンデンサ電源容量 C は 50

Fig. 5 General configuration of apparatus: (a) plan view of one-turn coil, pressurization foil, aluminum foil and die without insulator, (b) cross-sectional view with discharge circuit

μF である. 放電電流 I の周期 $T=10\text{ }\mu\text{s}$ に対し, 周波数 f_r は 100 kHz , 表皮深さ δ は約 $280\text{ }\mu\text{m}$ になる.

2 章で述べたように, 加圧箔の厚さ τ_p と δ の関係が $\tau_p < \delta$ なので, 高密度磁束はコイル上面の加圧箔を通過する. 通過した磁束が高導電率材のアルミニウム箔に交差するため, アルミニウム箔にも, 渦電流が流れる. その結果, 加圧箔とアルミニウム箔の両方に磁気圧力が加わり, 2 枚の箔は z 方向 (ダイ方向) に向かって円錐状に変形する. コイル電流 (放電電流) I はすべての電磁穴あけ実験で測定される.

ダイの外観を Fig. 6 に示す. 3 mm 厚のプリハードン鋼板に加工され, 円形穴の穴径は $2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.5$ および 0.4 mm である. 深さは約 1 mm で, 残りの 2 mm は穴径より大きい穴で空けられる. 横方向長さは 91 mm である. ダイの硬さは 350 HV である. Fig. 5(a)でコイル幅 b が 4 mm であるため, すべての円形穴はコイル幅内にある. また, コイル長さ方向 (y 方向) で同時穴あけが可能である^{5)~7)}.

Fig. 6 General configuration of die with circular holes (plan view)

5. IN30 アルミニウム箔の電磁穴あけ¹⁴⁾

5.1 放電電流

放電電流例を Fig. 7 に示す. IN30 アルミニウム箔の厚さは $50\text{ }\mu\text{m}$, 加圧箔厚は $100\text{ }\mu\text{m}$, 放電エネルギーは 0.165 kJ である. 放電電流は振動しながら減衰し, 約 $25\text{ }\mu\text{s}$ で零になる. 最大値時間 t_m , 零時間 t_0 および周期 T は, $2.32\text{ }\mu\text{s}$, $5.04\text{ }\mu\text{s}$ および $10.12\text{ }\mu\text{s}$ である. 放電電流の最大値 I_m は 70 kA であり, $I_m/t_m \approx 30\text{ kA}/\mu\text{s}$ になる. 周期 $T=10.12\text{ }\mu\text{s}$ に対し, 周波数 f_r は 99 kHz である. 表皮深さ δ は $281\text{ }\mu\text{m}$ になる. 放電電流 I の周期 T は, 加圧箔とアルミニウム箔の組み合わせで, $9.96 \sim 10.40\text{ }\mu\text{s}$ で変化し, 約 5% 異なる.

Fig. 7 Waveform of discharge current at 0.165 kJ energy

Table 1 Shearing stress of IN30 aluminum foils

Thickness $\tau/\mu\text{m}$	15	50	100	150
Shearing stress k/MPa	55.3	79.0	100	97.9

5.2 IN30 アルミニウム箔のせん断抵抗

パンチとダイを用い, IN30 アルミニウム箔のせん断抵抗 k を実測¹⁵⁾した. 1 枚あたりの k を Table 1 に示す¹⁶⁾. Table 1 のアルミニウム箔は金属箔と加圧箔に用いられる.

5.3 アルミニウム箔の電磁穴あけ

加圧箔の影響を調べるに際し, Fig. 5 の実験装置で加圧箔を除き, 基準となるアルミニウム箔のみについて, 放電エネルギーを 5 J ずつ増減して電磁穴あけの状況を調べた.

穴あけ時の最小放電エネルギー W_p とダイ穴径 d_h の関係を Fig. 8 に示す. 真値 W_p は, 電磁穴あけの再現性が良いため, 放電エネルギー $(W_p)_n$ を 5~7 回変え, W_p を挟みこむ実験で求められる. アルミニウムの箔厚 τ は, ○, ●印の 50 μm , △, ▲印の 100 μm , ◇, ◆印の 150 μm である. 15 μm 厚の箔は, 0.15 kJ 未満で低い磁気圧力と温度上昇に伴う軟化のため, 0.15 kJ 以上で溶融のため, 穴あけができなかった.

d_h が大きくなると, W_p は反比例的に減少する. 穴あけされたアルミニウム箔穴の状況は, 白抜き印の○, △と◇は溶融のない良好な穴あけ, 塗りつぶし印の●, ▲と◆は穴あけされた箔円周の一部に溶融あり, で区別される. 箔厚に関係なく, 穴径 $d_h < 1.0 \text{ mm}$ の良好な穴あけは難しい.

良好な穴あけの穴径 d_h は, 50 μm 厚の箔は $d_h \geq 2.5 \text{ mm}$, 100 μm 厚の箔は $d_h \geq 1.0 \text{ mm}$, 150 μm 厚の箔は $d_h \geq 1.5 \text{ mm}$ である. 放電エネルギーの増加で生じるアルミニウム箔の軟化や一部溶融は, 箔厚と穴径によって程度が異なる.

50 μm 厚の箔の穴あけは, 1.0~2.0 mm で一部溶融を伴う. 上述の 15 μm 厚の箔の穴あけで現れた現象と 100 μm 厚以上での良好な穴あけの境界に相当すると考えられる.

5.4 電磁穴あけにおける加圧箔の効果

アルミニウム加圧箔を用いる 15 μm 厚アルミニウム箔の穴あけの最小放電エネルギー W_p と穴径 d_h の関係を Fig. 9 に示す. 加圧箔が○印の 50 μm 厚と△印の 100 μm 厚は,

Fig. 8 Discharge energy at piercing for metal foils

Fig. 9 Discharge energy at piercing using pressurization foil

Fig. 10 Discharge energy at piercing using pressurization foil

$d_h \geq 0.5 \text{ mm}$ で, ◇印の 150 μm 厚は, $d_h \geq 1.0 \text{ mm}$ で穴あけ可能になる. 15 μm 厚アルミニウム箔のみでの磁気圧力の不足や箔の軟化と溶融が解消され, 加圧箔の効果が現れる. 加圧箔厚 τ_p が大きいと, 穴あけの最小放電エネルギー W_p は, 変形に高いエネルギーを要するために高くなる. 低い W_p で穴あけ可能な加圧箔厚が存在する. 15 μm 厚アルミニウム箔の穴あけでは, 50 μm 厚と 100 μm 厚の加圧箔がよい.

加圧箔を用いる 50 μm 厚アルミニウム箔の穴あけの最小放電エネルギー W_p と穴径 d_h の関係を Fig. 10 に示す. 加圧箔厚 τ_p は, ○, ●印が 50 μm , △印が 100 μm , ◇印が 150 μm である. 加圧箔を用いない 50 μm 厚アルミニウム箔の穴あけは, Fig. 8 ●印の 1.0~2.0 mm で一部溶融を伴う. しかし, 50 μm 厚加圧箔を用いる場合, ●印の $d_h = 0.5 \text{ mm}$ を除き, $d_h \geq 1.0 \text{ mm}$ で溶融のない良好な穴あけができる. 加圧箔の効果が現れている. Fig. 9 と Fig. 10 から, 一部溶融と良好な穴あけの境界エネルギー W_p は 0.3 kJ 弱と思われる.

Fig. 9 と Fig. 10 で, $d_h < 1.0 \text{ mm}$ で W_p が急増する理由は, 電磁穴あけがダイ切れ刃のみのせん断加工であり, Fig. 4 に示されるように, 電磁力が作用する面積が小さいためと考えられる. 加圧箔を用いると, パンチレスでダイのみの電磁穴あけは, $d_h > 0.5 \text{ mm}$ で 15~50 μm 厚の極薄のアルミニウム箔の穴あけ加工に適する.

Fig. 8 と Fig. 10 の 50 μm 厚アルミニウム箔の穴あけで, 加圧箔の有無による最小放電エネルギー W_p のエネルギー比を Fig. 11 に示す. Fig. 8 の 50 μm 厚アルミニウム箔のみの W_p を基準にする. 加圧箔厚 τ_p が○印の 50 μm では, 放電エネルギー比は穴径 d_h が 1.0~2.5 mm で 1.0 未満であり, 低い放電エネルギーで穴あけできる. アルミニウム箔と加圧箔それぞれの磁気圧力が合わさった効果が現れている. 加圧箔厚 τ_p が△印の 100 μm および◇印の 150 μm に大

Fig. 11 Ratio of piercing energy

Fig. 12 Schematic cross-sectional view of piercing of metal foil using pressurization foil

きくなると、加圧箔の変形に要するエネルギーが高くなるため、放電エネルギー比は大きくなり、 τ_p が150 μm で1.0を超える。適切な加圧箔厚 τ_p は、50 μm と100 μm である。

穴あけ試料の目視から、加圧箔を用いるアルミニウム箔の電磁穴あけの状況を Fig. 12 の模式図で示す。2 枚の箔に磁気圧力が加わり、Fig. 12(a)のように、2 枚の箔は高速変形し始める。変形の進行に伴い、Fig. 12(b)のように2 枚の箔はダイ円周部の外側でダイ平面に固着され^{7),11)}、円周部のアルミニウム箔は、切れ刃によってせん断される。最小放電エネルギー W_p での穴あけ終了時、25 μm 厚テフロンフィルムは傷つくが、せん断されない。

5.5 セン断時の磁気圧力と穴径の関係¹⁶⁾

Fig. 10 の50 μm 厚のアルミニウム箔に加圧箔を用いる電磁穴あけで、最大磁気圧力 P_m と穴径 d_h の関係を Fig. 13 に示す¹⁶⁾。 P_m は W_p における放電電流 I の最大値 I_m の磁気圧力であり、2 枚の箔について式(5)で計算される。良好な穴あけの○、△および◇印の P_m は異なる。 I の周期 T がほぼ同じため、穴あけに要する時間が異なると考えられる。

P_m は Fig. 10 の W_p に似た曲線である。磁気圧力 P が放電電流 I の2乗に比例し、 I_m が W_p の1/2乗に比例¹⁴⁾するため、 P_m は W_p に比例する。この比例関係は金属薄板の電磁穴あけ⁷⁾と同じ結果であるが、 P_m は低く約1/10倍である。

Fig. 13 Relationship between maximum magnetic pressure for aluminum foil using pressurization foil

6. SUS304 ステンレス箔の電磁穴あけ¹⁶⁾

アルミニウム加圧箔を通過した磁束はステンレス箔に交差する。ステンレス箔の導電率がアルミニウム箔の約1/25倍のため、式(4)の表皮深さ δ は非常に大きい。式(5)から、ステンレス箔両面の磁気圧力差は非常に小さい。導電率が低いステンレスなど金属箔の電磁穴あけは、加圧箔の変形圧力をステンレス箔に伝達し、変形させて行われる¹¹⁾。

6.1 SUS304 ステンレス箔のせん断抵抗とダイ

せん断抵抗測定¹⁵⁾で得られたせん断抵抗 k を Table 2 に示す。 k は Table 1 の IN30 アルミニウム箔の8~15倍である。ダイは Fig. 6 と同様の円形穴であるが、穴径が2.5, 2.0, 1.5, 1.0 mm の2連構造¹⁶⁾である。SKD 板で作製され、硬さは740 HV である。円形穴はコイル幅4 mm 内にある。

6.2 SUS304 ステンレス箔の電磁穴あけ

20 μm 厚ステンレス箔について穴あけ時の最小放電エネルギー W_p を Fig. 14 に示す。穴径 d_h が1.0~2.5 mm で、 W_p は加圧箔厚が△印の100 μm 、◇印の150 μm 、○、●印の50 μm の順番で高くなる。Fig. 3 から、50 μm 厚加圧箔は、厚さが小さく磁気圧力が低いため、穴あけに要する W_p は高くなる。また、●印の穴径 d_h が1.0 mm で、ステンレス箔にしわが生じた。これらから、50 μm 厚箔は加圧箔に適していない。適切な加圧箔厚は、100 μm と150 μm である。

ステンレス箔厚に対し、アルミニウム加圧箔の厚さを選択すると、低い放電エネルギーで穴あけができる。Fig. 14 の W_p における最大磁気圧力 P_m と穴径 d_h の関係を Fig. 15

Table 2 Shearing stress of SUS304 stainless-steel foil

Thickness τ / μm	20
Shearing stress k / MPa	820

Fig. 14 Discharge energy at piercing using pressurization foil

Fig. 15 Relationship between maximum magnetic pressure for stainless-steel foil with pressurization foil

に示す。 P_m はアルミニウム加圧箔に加わる最大磁気圧力である。良好な穴あけの P_m が異なる理由は、Fig. 13 と同様に、穴あけに要する時間が異なるためと考えられる。

Fig. 15 の P_m は、Fig. 13 のそれとほぼ同じである。ステンレス箔厚は $20\text{ }\mu\text{m}$ で、Fig. 13 の $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚アルミニウム箔の 0.4 倍であるが、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚ステンレス箔のせん断抵抗 k は $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚アルミニウム箔の約 10 倍である。 P_m がほぼ同じであるから、断面の状況が異なると予想される。

7. 穴あけされた金属箔の断面

加圧箔を用いる $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚アルミニウム箔の円錐状抜きかすの SEM 写真を Fig. 16 に示す。穴径は 1.5 mm で、Fig. 16(a) は全体図、Fig. 16(b) はせん断面、Fig. 16(c) は拡大図である。Fig. 16(b), (c) から、断面全域はせん断されている。

加圧箔を用いる $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚ステンレス箔の円錐状抜きかすの SEM 写真を Fig. 17 に示す。Fig. 17(a) の全体図で、ステンレス箔の高さは小さい。せん断抵抗 k が高く抵抗力が大きいためである。Fig. 17(b), (c) から、断面は主に白線で分けられるダイ側のせん断面とコイル側の破断面がある。破断面にディンプルが見受けられる。厚さ方向に破断するため、Fig. 15 のように、低い P_m で穴あけされると考えられる。

Fig. 16 50 μm -thick aluminum sample sheared using pressurization foil, observed by SEM

Fig. 17 20 μm -thick stainless-steel sample sheared using pressurization foil, observed by SEM

8. 結 言

アルミニウム加圧箔を用いる IN30 アルミニウム箔と SUS304 ステンレス箔の電磁穴あけで、以下の結論を得た。

- (1) 電磁穴あけ原理式の数値的検討から、アルミニウム箔厚が小さいと、箔を通過する磁束が増えるため、磁気圧力は低くなる。また、ダイ穴径内のアルミニウム箔に生じる電磁力は、穴径の 2 乗に比例する。
- (2) アルミニウム箔のみの穴あけでは、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 厚箔の穴あけは、磁気圧力の不足および一部溶融のため、不可能である。

- 良好な穴あけのダイ穴径は、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚箔は 2.5 mm 以上、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚箔は 1.0 mm 以上および $150\text{ }\mu\text{m}$ 厚箔は 1.5 mm 以上である。 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚以下の箔の良好な穴あけは難しい。
- (3) 加圧箔を用いると、 $15\text{ }\mu\text{m}$ 厚アルミニウム箔は穴径 0.5 mm 以上、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 厚箔は穴径 1.0 mm 以上で、良好な穴あけが可能になる。加圧箔によるアルミニウム箔の溶融の抑制、および 2 枚の箔に磁気圧力が加わるためである。
- (4) $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚ステンレス箔の穴あけは、適切な加圧箔厚を選択すれば、ダイ穴径が 1.0 mm 以上で可能である。
- (5) 電磁穴あけでは、金属箔はダイ穴の外側でダイ平面に固着され、ダイ切れ刃でせん断される。加圧箔を用いると、パンチレスの電磁穴あけは、 $d_h > 0.5\text{ mm}$ で $15\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 厚の極薄のアルミニウム箔の穴あけ加工に適する。
- (6) せん断抵抗の小さいアルミニウム箔は断面全域でせん断される。一方、せん断抵抗の大きいステンレス箔の断面は、主にダイ側でせん断面、コイル側で破断面である。

謝 辞

穴あけされた円錐状抜きかすの断面を SEM 観察いただきました。千葉大学 糸井貴臣准教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Shiratori, T., Katoh, M., Suzuki, Y., Aihara, T. & Yang M.: Proc. 2016 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2016), 313-314.
- 2) Nihon Sosei-Kako gakkai hen: Sendankakoh, (1992), 19, CORONA PUBLISHING CO.LTD.
- 3) Koga, N., Ikushima, A. & Yamaguchi, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **57**-660 (2016), 41-46.
- 4) Shiratori, T., Suzuki, Y., Nakano, S. & Katoh, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **57**-671 (2016), 1118-1121.
- 5) Aizawa, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **38**-438 (1997), 621-625.
- 6) Okagawa, K., Aizawa, T., Shindou, Y. & Fukuda, T.: Proc. 52th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2001), 369-370.
- 7) Sakamoto, M., Hiroi, T., Okagawa, K. & Ishibashi, M.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **59**-687 (2018), 59-63.
- 8) Nakano, S., Katoh, M., Suzuki, Y., Aihara, T. & Shiratori, T.: Proc. 2016 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2016), 315-316.
- 9) Yamashita, M. & Mori, T.: Proc. 66th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2015), 385-386.
- 10) Katoh, M., Nakano, S., Suzuki, Y., Aihara, T. & Shiratori, T.: Proc. 2016 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2016), 345-346.
- 11) Okagawa, K., Aizawa, T., Matsuzawa, K., Hiroi, T. & Miyazaki, H.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **49**-565 (2008), 158-162.
- 12) Hiroi, T., Okagawa, K., Matsuzawa, K. & Manabe, K.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **55**-640 (2014), 440-444.
- 13) Okagawa, K., Ishibashi, M., Hiroi, T. & Sakamoto, M.: 67th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2016), 187-188.
- 14) Ishibashi, M., Okagawa, K., Hiroi, T. & Sakamoto, M.: Proc. 2017 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2017), 163-164.
- 15) Sakamoto, M., Hiroi, T., Okagawa, K. & Ishibashi, M.: 67th Jpn. Jt. Conf. Technol. Plast., (2016), 191-192.
- 16) Okagawa, K., Ishibashi, M., Hiroi, T. & Sakamoto, M.: Proc. 2017 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2017), 165-166.