

# 切削加工および酸エッチング処理が 圧粉磁芯の磁気特性に与える影響

東川 勇登\*, 高橋 康人, 藤原 耕二 (同志社大学)  
青山 真大, 赤木 亮介 (スズキ)

Influences of Machining and Acid Etching on Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite  
Yuto Higashigawa\*, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara (Doshisha University),  
Masahiro Aoyama, and Ryosuke Akaki (Suzuki Motor Corporation)

## 1. まえがき

圧粉磁芯は、絶縁被膜を施した鉄粉を圧縮成形して作製される軟磁性材料であり、形状自由度に優れ、渦電流損の低減が可能であると言った特長を有している。圧粉磁芯をモータ鉄芯として使用する場合には、圧縮成形後に切削加工を施す必要があるが、この切削加工によって磁気特性が劣化することが知られている<sup>[1]</sup>。その原因としては、切削加工により試料表面の絶縁が破壊されることが考えられる。そこで本稿では、切削加工済みの圧粉磁芯に酸エッチング処理を施し、磁気特性の改善の程度を検討した。

## 2. 抵抗率測定

切削加工（試料全面、切削量 0.1 mm/面、ラジラスエンドミル  $\phi 4$  mm、回転速度 10,000 min<sup>-1</sup>、送り 1,000 min<sup>-1</sup>）によって表面が劣化していると考えられる圧粉磁芯（Höganäs 社製 Somaloy 700 3P を 600 ton プレス機で密度 7.43 g/cm<sup>3</sup> 程度に金型成形、スチーム処理）に酸エッチング処理（H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 85% を 4 倍希釈）を施し、表面層を除去することを試みる。切削加工後の試料に酸エッチング処理（浸漬時間 [min] : 9, 45, 54, 63, 72, 81）を施し、抵抗率  $\rho$  を測定した。図 1 に、測定回路を示す。試料としては、最終的な使用形態を考慮して環状試料とした。180° 開いた 2 箇所を銅テープを貼り付けて電極とし、直流電流  $I$  を印加した状態で電位差測定用プローブの先端の中心角  $\theta$  を変化させ、試料表面の 2 点間における電位差  $V$  を測定した。電流密度  $J$  が試料内で均一になるように、銅テープの上下面にリード線を接続した。なお、プローブ先端位置を固定するために、専用の治具を作製した。 $I$  は、標準抵抗  $R_0$  の端子電圧  $V_0$  から算出した。試料の厚さを  $D$ 、内径を  $r_{in}$ 、外径を  $r_{out}$  とすると、 $I$  は次式で表すことができる。

$$\frac{I}{2} = D \int_{r_{in}}^{r_{out}} J dr = \frac{VD}{\rho \theta} \ln \frac{r_{out}}{r_{in}} \quad (1)$$

複数の  $\theta$  に対する  $V/(I/2)$  の変化から、その傾き  $a$  を線形近似して次式で  $\rho$  を算出し、異なる電位差測定位置（試料の平均半径、その内側および外側）で得られた結果を平均した。

$$\rho = aD \ln(r_{out}/r_{in}) \quad (2)$$

図 2 に、酸エッチング処理時間が抵抗率に与える影響を示す。ただし、抵抗率の最大値で正規化した。酸エッチング処理により、切削加工によって劣化した表面層が除去されるため、浸漬時間の増加に伴い抵抗率が增加するが、浸漬を必要以上に継続すると正常な絶縁被膜が破壊され、抵抗率が低下すると考えられる。

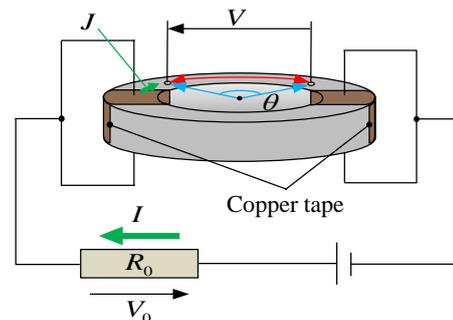


図 1 抵抗率測定回路

Fig. 1. Measuring circuit for electrical resistivity.

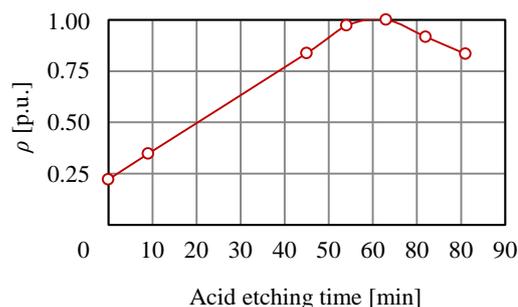


図 2 酸エッチング処理時間が抵抗率に与える影響

Fig. 2. Effect of acid etching time on resistivity.

## 3. 磁気特性測定

抵抗率測定時と同様の加工条件の環状試料を用いて、磁気特性の測定を行った。磁束密度検出用サーチコイル（B コイル）の誘導起電力（ $v_b$ ）波形が正弦波となるように波形制御を行い、最大磁束密度  $B_m$  を 0.05 T から 1.80 T まで 0.05 T 刻みで変化させた。磁界の強さ  $h$  の時間的变化は、励磁電流法により算出した。波形制御の収束条件は、 $v_b$  波形の波形率の

正弦波の波形率に対する誤差が 0.05 % 以下,  $B_m$  の目標値に対する誤差が 0.05 % 以下,  $v_b$  の歪率が 2 % 以下とした. 測定には, 独自に構築したデジタル磁気特性測定システムを使用した<sup>[2]</sup>.

図 3 に, 1 kHz 時の測定で得られた磁化特性 ( $B_m$ : 最大磁束密度,  $H_b$ :  $B_m$  時の磁界の強さ), 比透磁率 ( $\mu_s$ ) 特性, 鉄損 ( $W$ ) 特性の比較を示す. それぞれについて, 未加工時の最大値で正規化した. 酸エッチング処理時間が増加するにつれて, 磁界の強さが増加し, 比透磁率が低下していることがわかる. しかしながら, 鉄損特性については, 酸エッチングの浸漬時間に関わらず, 切削加工前の特性とほとんど変わらないことが確認できた.

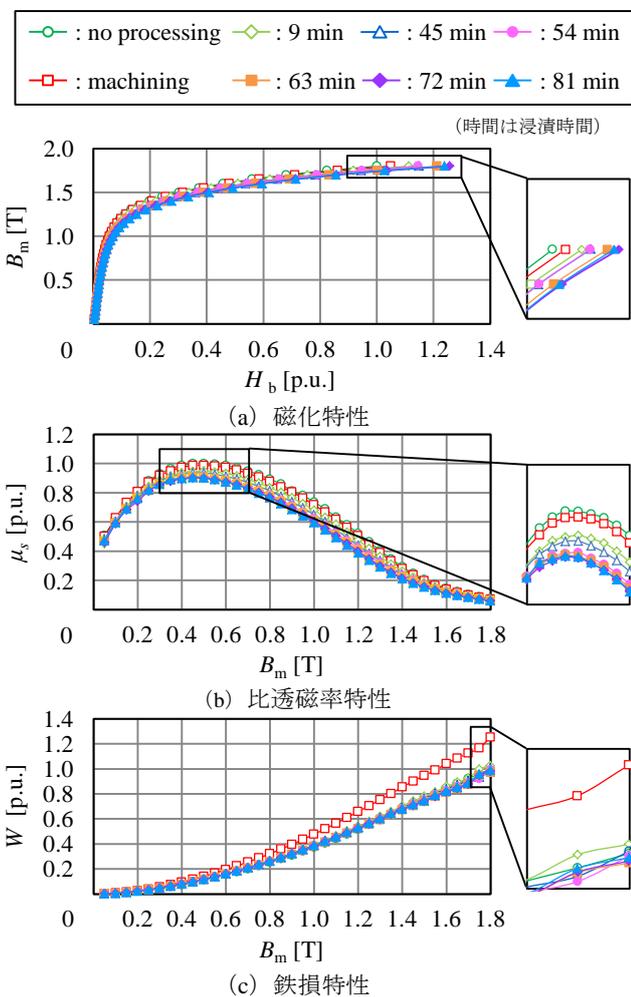


図 3 酸エッチング処理時間が磁気特性に与える影響  
Fig. 3. Effect of acid etching time on magnetic properties.

#### 4. 鉄損分離

図 5 に, 50, 100, 500, 1k Hz の結果を線形近似して鉄損分離を行い, ヒステリシス損係数  $k_h$ , 渦電流損係数  $k_e$  を算出した結果を示す. いずれの係数も, 未加工時の  $B_m = 1.8$  T における  $k_h$  の値で正規化した.  $k_h$  は, 切削加工後に酸エッチン

グ処理を施す時間 (浸漬時間) が増加するにつれて減少しているが, 大きな変化は見受けられない. 一方  $k_e$  は, 浸漬時間に関わらず切削加工前とほとんど変わらず, 比較的短い浸漬時間で劣化した表面層を除去可能であることが確認できた.

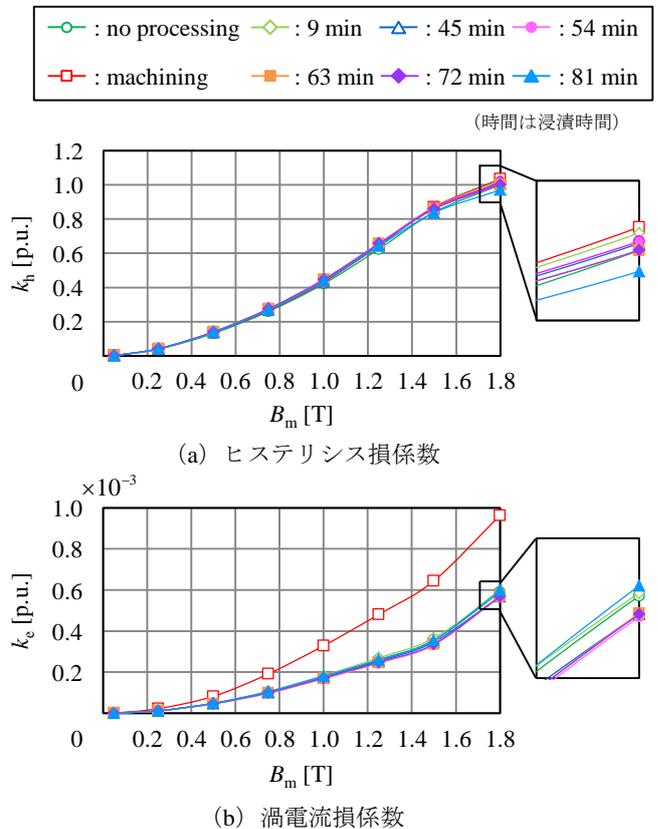


図 4 鉄損分離結果

Fig. 4. Core loss separation.

#### 5. まとめ

切削加工後, 酸エッチング処理時間が約 60 分で抵抗率は最大になったが, 切削加工後の酸エッチング処理による磁界の強さの増加 (透磁率特性の劣化), および渦電流損係数が浸漬時間にほとんど依存しないことを考慮すると, 酸エッチング処理は最小限で差し支えないと考えられる. 圧粉磁芯の磁気特性が劣化しない最適な浸漬時間について, 今後検討を行う予定である.

#### 文献

- [1] 相曾浩平・赤津 観: 「圧粉磁芯の磁気特性を考慮したアキシタル型 SRM の設計」, 電学論 D, vol. 136-D, no. 9, pp. 664-665 (2016)
- [2] Y. Kimura, T. Shibataki, Y. Takahashi, K. Fujiwara, H. Ishizuka, M. Fujita, H. Fujimura, K. Wajima, and E. Minematsu, "Measurement of Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steel Sheets Up to High Flux Density for Magnetic Field Analysis of Generator," *International Colloquium of CIGRE Study Committee AI (Rotating Electrical Machines)*, pp. 1-10 (2017).