

低鉄損圧粉磁心に対する通電加工技術の開発

上野友之*・松沼健二・西岡隆夫

Study on Electrolytic Re-insulation Grinding of Soft Magnetic Powder Cores — by Tomoyuki Ueno, Kenji Matsunuma and Takao Nishioka — Soft magnetic powder cores are used for electromagnetic conversion coils which are essential for automotive, home appliance, and electronics industries. These cores, manufactured by compacting pure iron powder covered with an insulation film, are distinguished by their high electromagnetic conversion efficiency. However, the electromagnetic conversion efficiency drastically decreases when they are subjected to the conventional finishing process. This is directly attributable to the conductive layers formed on the finished surface that significantly reduce the electrical resistance of the core surface. To solve this problem, we have developed an electrolytic re-insulation grinding method that finishes the core while an electric current is applied to the interface between the core and the grinding wheel. This method regenerates the insulation property of soft magnetic powder cores through the electrolytic removal of the conductive layers formed during the finishing process to improve the electrical resistance. This development enables the manufacturing of soft magnetic powder cores without compromising their electromagnetic conversion efficiency.

Keywords: electrolytic re-insulation grinding, soft magnetic powder core, ELID electrical resistance, insulation film, iron loss

1. 緒言

低炭素化社会の実現に向けて、自動車の電動化や家電・エレクトロニクスの省電力化、クリーンエネルギーの活用等が推進されている。これらの機構の中核を担う部品のひとつに鉄心と巻線から構成される電磁変換コイルがある。その一例として、電磁モータや電圧変換トランス等が挙げられる。近年、上述の軟磁性鉄心材料として圧粉磁心が注目されており⁽¹⁾、当社においてもクリーンディーゼルエンジンの燃料噴射弁の開閉に用いられるインジェクタコア⁽²⁾を実用化し、ハイブリッド自動車のバッテリー電圧を昇圧するリアクトル⁽³⁾、変圧回路や整流回路に用いられるチョークコイル⁽⁴⁾等も実用化に向け開発している。本材料は、絶縁被膜で覆われた純鉄粉をプレス成形して作製することができ、従来の電磁鋼板に対して電気抵抗が高く、特に高周波領域で優れた電磁変換効率を示す。しかし、機器の高精度化や小型化に伴い、本材料にも高い寸法精度や複雑な形状が要求されており、粉末成形後に仕上げ加工が必要である。この手法として切削加工や研削加工等が提案されている⁽⁵⁾。しかし、圧粉磁心に対して一般的な加工を行うと、電磁変換効率の著しい低下という致命的な課題が発生する。その原因は、以下の2点に示す材料表面の大幅な電気抵抗の低下と考えられる。①加工表面では、圧粉磁心の特長である絶縁被膜が削り取られる点。②加工応力を受けた純鉄粉粒子が塑性流動し、隣接する純鉄粉粒子同士が導通し、加工表面に電気抵抗が低い導通層が形成される点である。特に、高周波領域で良好な電磁変換効率を得るために

は電気抵抗が重要な特性であるため、それを低下させない新たな加工法の実用化が必要である。本課題の解決に向けた別の取り組みとして、化学的な酸エッチング処理により導通層を除去することが一般に知られている。しかし、酸処理後には洗浄と中和が必要であるため大量に排出される廃液処理の問題が生じ、昨今の環境問題への関心の高まりの観点からも望ましい手法とは言えない。

本報では、電気抵抗を低下させることなく圧粉磁心の仕上げ加工が可能となる絶縁再生研削法の実用化について詳述する。本手法は、高効率に鏡面加工が可能なELID研削⁽⁶⁾を応用した加工法である。ELID研削^{*1}の応用技術としては、超精密金型や生体材料に対して新たな表面機能を付与する表面改質加工技術が複数提案されている^{(7),(8)}。本報での提案は、更に圧粉磁心という電磁気変換に使用される機能性材料へと応用の範囲を広げた手法である^{(9),(10)}。具体的には、圧粉磁心と研削砥石間に通電することにより、加工表面に生じた導通層を電解除去すると共に、削り取られた絶縁被膜の代わりとなる高電気抵抗な不導体被膜を再形成できることが特徴である。筆者らは、本手法の原理の検証を一般的な研削加工との比較を用いて行った。更に、その効果を実証するため、絶縁再生研削法を適用した圧粉磁心の電気抵抗および電磁変換効率の指標である鉄損特性の評価を行った。更に、本手法を適用した圧粉磁心の加工面の防錆力を評価するために、大気放置試験を実施した。

2. 新開発の絶縁再生研削法の原理

図1に新たに開発した絶縁再生研削法を行うための加工装置の模式図を示す。電解用に設置した電源の陽極を圧粉磁心に、陰極を導電性砥石または砥石からギャップを介して設けた電極のどちらか一方にそれぞれ接続した後に通電を行う。この時、陰極を砥石に直接接続するとより効率的に加工表面に生じた導通層の電解除去が行える。一方、陰極を砥石からギャップを介した電極に接続すると、導通層の電解除去に加えて加工中にはELID研削の効果も同時に得られる。電解除去を効率的に行うために、圧粉磁心と砥石間、および砥石と電極間には導電性の研削液を供給する。また、圧粉磁心は加工装置から絶縁されていることが必要であり、本報ではアルミナ板を絶縁体として使用している。

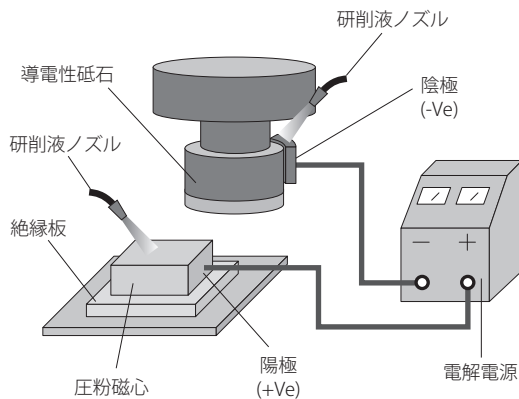


図1 絶縁再生研削法の模式図

次に、本手法を適用して加工後に電気絶縁性を再生する原理を、図2の(1)～(4)の模式図を用いて説明する。(1)加工前の圧粉磁心の表面は、既述の通り絶縁被膜で覆われた純鉄粉で構成されている。純鉄粉粒子同士の粒界は明瞭であり、かつ絶縁被膜の効果によって、圧粉磁心は高い電気抵抗を有している。(2)研削加工を行った圧粉磁心の表面は、絶縁被覆が削り取られ、かつ加工応力により表面の粒子が塑性流動して粒界が不明瞭な導通層を形成しており、電気抵抗が大きく低下する。(3)加工後のスパークアウト^{※2}時に圧粉磁心(陽極)と導電性砥石(陰極)間に通電し、加工表面に露出した純鉄の導通層が溶出してイオン化する。同時に、研削液の電気分解により水酸基が発生する。(4)通電を継続し、加工で生じた表面の導通層を電解除去する。更に電解が促進すると、鉄イオンと水酸基が結合した水酸化鉄の不導体被膜が圧粉磁心の加工表面に形成し、これが加工で削り取られた絶縁被膜の代替を果たすため、圧粉磁心の電気抵抗が再び向上する。

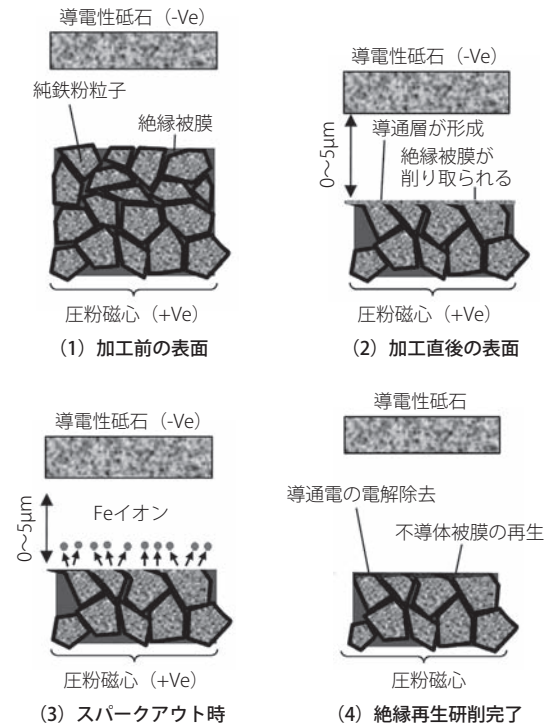


図2 絶縁再生研削法の原理

3. 圧粉磁心に及ぼす仕上げ加工の影響調査

3-1 実験方法 評価に使用した圧粉磁心は、外径34mm、内径20mm、厚さ5mmのリング形状である。本形状に原料粉末をプレス成形にてネットシェイプで作製した材料(A-1材)及び、ブロック形状の素材から一般砥石を用いた通常の研削加工により同寸法に仕上げた材料(A-2材)をそれぞれ作製した。表1に実験条件を示す。材料表面の電気抵抗は、直列4深針プローブを用いて測定を行った。また、電気抵抗に影響を受ける電磁変換効率を表す指標として、周波数1kHzから10kHzの交流磁界を印加して各周波数毎に鉄損特性を測定した。鉄損特性とは、電磁変換時に失われる電気エネルギーを重量比率で表した指標であり、その値が小さいほど電磁変換効率が良いことを意味し、ヒステリシス損失と渦電流損失の和で示される。各損失の詳細については後述する。

表1 リング形状圧粉磁心の作製条件

項目	A-1材 (プレス成形)	A-2材 (通常研削)
密度	$7.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$	$7.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
研削砥石	未使用	#80 PA
研削液	未使用	油性
砥石周速	未使用	1800m/min
送り速度	未使用	2mm/min

3-2 電気抵抗および鉄損特性の評価結果 各素材を作製した後に電気抵抗を測定した結果、A-1材が $580 \times 10^{-3} \Omega m$ 、A-2材が $43 \times 10^{-3} \Omega m$ であり、通常の研削加工で仕上げたA-2材の電気抵抗は1/10以下に大きく低下した。図3に評価周波数毎の鉄損特性を示す。図より周波数が高くなるに従い鉄損が大きくなり、かつA-1材よりもA-2材の鉄損が大きいことが解る。ここで、図中のヒステリシス損失は材料の保磁力に起因しており、周波数に比例して増大する。また、渦電流損失は材料の電気抵抗に起因しており、周波数の2乗に比例して増大する。従って周波数が高くなるほど渦電流損失の増大が著しくなるため、高周波領域で用いるためには電気抵抗が最も重要な特性である。本結果より、圧粉磁心に対して通常の研削加工を用いて仕上げを行うと電気抵抗が低下し、高周波領域において鉄損が2倍以上に増大する課題が明白となった。

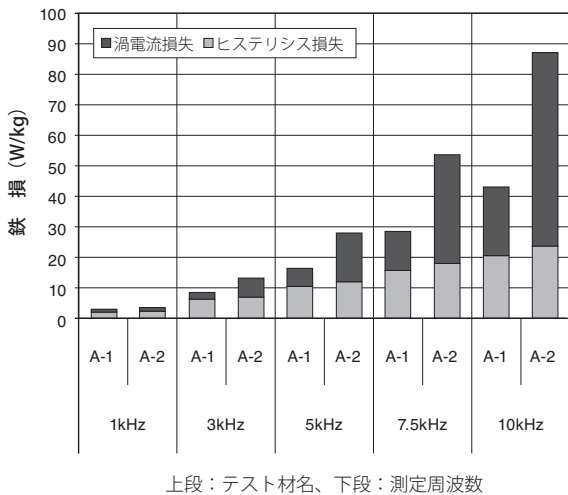


図3 トロイダル形状の鉄損特性

3-3 一般研削法で電気抵抗が低下する原因考察 通常の研削加工により電気抵抗が低下した原因のひとつは、加工面では絶縁被膜が削り取られて電気抵抗の低い純鉄が露出しているからである。図4にA-1材、A-2材それぞれの表面および断面のSEM観察像を示す。図4(a)(b)から、加工前の圧粉磁心の表面では純鉄粉の粒界が明確に判別できるのに対して、図4(c)(d)の加工後の表面では個々の粒界の判別ができない。

更に図4(d)の最表面を詳細に観察すると、隣接する粒子間に形成された導通層が確認できる。以上の観察結果より、通常に研削加工を行った圧粉磁心の電気抵抗は、加工面に生じた導通層の影響により大幅に低下し、結果として電磁変換効率が著しく低下したと考えられる。

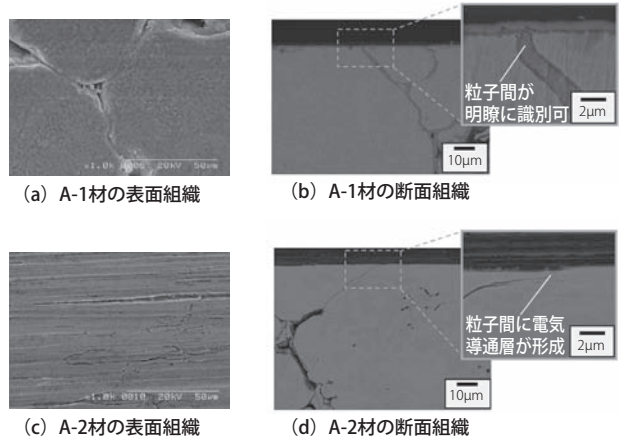


図4 トロイダル形状試験片のSEM観察像

4. 電気絶縁性を再生可能な新加工法の開発

4-1 実験方法 評価材料として、30mm×20mm×15mmの四角柱形状の圧粉磁心を準備し、その外周面を絶縁再生研削法で加工した材料(B-1)材及び、同じ砥石を用いるが通電による導通層の電解除去を行わない材料(B-2材)をそれぞれ作製した。

図5に使用した装置の外観写真を示す。本装置は、立形マシニングセンタに電解用のパルス電源を接続した開発機

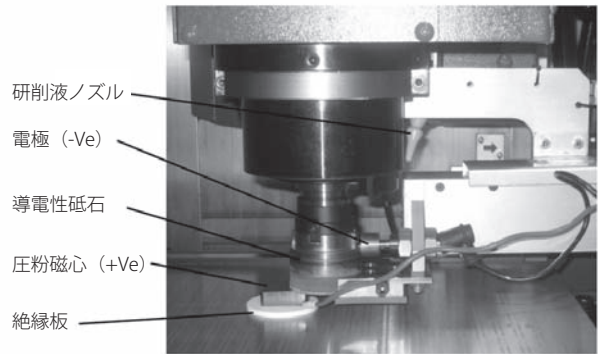


図5 絶縁再生研削法の加工装置

表2 絶縁再生研削法と一般研削の加工条件

項目	B-1材 (絶縁再生研削)	B-2材 (通電なし研削)
研削砥石	#325 CBN メタルボンド	#325 CBN メタルボンド
研削液	水溶性	水溶性
砥石周速	900m/min	1800m/min
送り速度	1mm/min	2mm/min
電解電圧	90V	未使用
電解電流	10A	未使用
パルス間隔	1/1μs (on/off)	未使用

である。ここで陰極は、SUS電極からギャップを介して砥石に通電している。表2に実験条件および電解条件を記載する。

4-2 評価結果および考察 加工面の電気抵抗を測定した結果を図6に示す。図より絶縁再生研削法を用いたB-1材の電気抵抗は、加工前と同等の値が得られていることが解る。一方、通電を行わずに通常に研削加工したB-2材の電気抵抗は、加工前の約1/6と大幅に低下している。本結果より、開発手法を用いることで通常の研削加工では得られない高い電気抵抗を持つ圧粉磁心を作製することが可能と言える。更に、導通層を電解する際の圧粉磁心と砥石とのクリアランス量やクーラント流量、通電条件を調整することによって、最新のデータでは $5000 \times 10^{-3} \Omega m$ を超える非常に高い電気抵抗を得ることに成功した。

更に、鉄損特性を測定した結果を図7に示す。図より絶縁再生研削法を適用して作製したB-1材の鉄損は、加工前と同等の値である。一方、通電を行わない通常の研削加工法で作製したB-2材の鉄損は、加工前やB-1に対して3倍近くに増大している。これは、B-2材の電気抵抗が大幅に低下したことに起因している。以上の結果より、開発手法は、圧粉磁心の利点である電磁変換効率を損なわない仕上

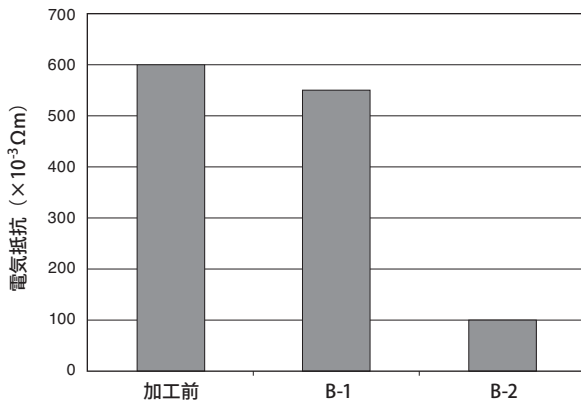


図6 加工面の電気抵抗

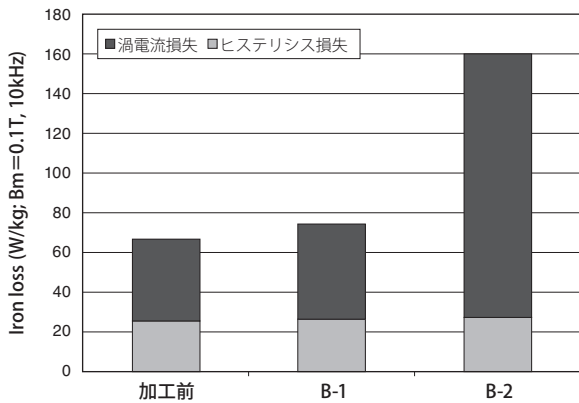


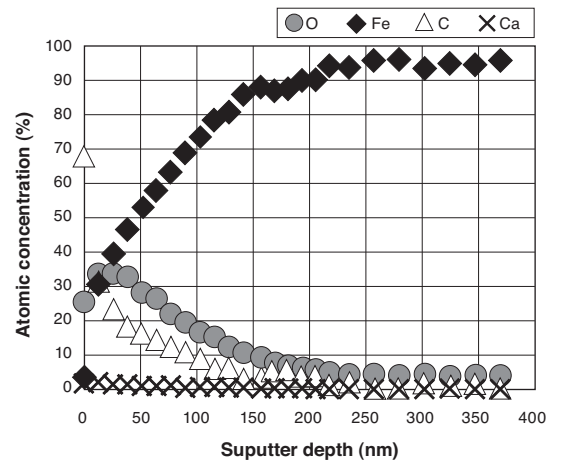
図7 加工後の圧粉磁心の鉄損特性

げ加工法として有効であると結論づけられる。

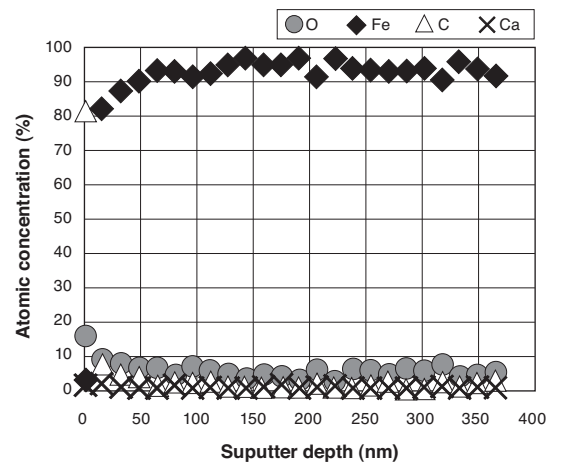
次に、我々が提案する絶縁再生の原理を検証するため、B-1材およびB-2材それぞれの加工表面から深さ方向にX線光電子分光 (ESCA; Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) 分析を行った結果を図8に示す。

図8 (a) に示す絶縁再生研削法を用いたB-1材では、深さ約100nm程度まで酸素 (O) が検出されていることから、加工面にはFeとOの化合物の層が形成されていると推測される。一方、図8 (b) に示す通電を行わずに加工したB-2材では、最表面には不純物成分と考えられる炭素 (C) と酸素 (O) のピークがみられるものの、それ以降の深さにおいては原子濃度に変動がなく鉄 (Fe) が主成分であり、表面は基材である純鉄が露出していると考えられる。

次に、B-1材において表面層のFeの結合状態をメスバウアー分光法を用いて分析した。本報では、分析対象がバルク体の表面であるため、CEMS (Conversion Electron Mossbauer Spectroscopy) 法を用いた。得られたFeの



(a) B-1材の深さ方向ESCA分析



(b) B-2材の深さ方向ESCA分析

図8 絶縁再生研削面と通電なし加工面のESCA分析

スペクトルを図9に示す。図中の横軸は、⁵⁷Co- γ 線波の速度、縦軸のピーク値は規格化した値である。これにより表面から約300nm深さにおける鉄原子比率での組成を調査した。得られたスペクトルを2本のサブスペクトルに分解し、フィッティングを行った結果を図10の[1]、[2]に、この結果を元に解析を行った結果を表3にそれぞれ示す。ここで、異性体シフト(δ)は原子核位置でのs電子の密度を反映しておりFeの価数の指標となり、四極分裂(Δ)は結晶構造の対称性を反映しており歪みの指標である。また、内部磁場(H)は磁気的な秩序性を反映しており、強磁性体及び反強磁性体で正の値を取り、常磁性体では0である。

図10と表3に示すフィッティング結果[1]は、内部磁場が高く強磁性体に特徴的な6本に分裂したスペクトルが観察されることから、圧粉磁心の基材である α -Feと考えら

れる。従ってフィッティング結果[2]が、絶縁再生研削法により加工表面に再生した不導体被膜を反映している。ここで、典型的なFeの酸化物であるFe₂O₃やFe₃O₄は強磁性体であるため該当せず、異性体シフトの値からFe(3+)イオンを含む化合物と推定される。ここで、 α -FeOOH、 δ -FeOOH、 ϵ -FeOOHは強磁性体であり上記同様の理由で該当せず、従って[2]の帰属は、表4に示す内部磁場を有しない常磁性体である β -FeOOH、 γ -FeOOHまたはFerrihydrite等の鉄の水酸化物である可能性が高い。ここで、一般的に β -FeOOHの生成には高濃度の塩素イオンが必要とされている⁽¹¹⁾。塩素イオンは研削液に含まれている可能性が考えられるため、イオンクロマトグラフ法にて研削液中の塩素イオン濃度を分析した結果、56ppmであった。これは標準的な水道水と大差ない濃度であり、 β -FeOOHが主成分とは考え難い。また、 γ -FeOOHは四極分裂の値が[2]に対して乖離が大きいため該当しないと考えられる。従って、表4に記載のメスバウアーパラメータが非常に近いFerrihydriteである可能性が高いと考えられる。以上の考察から、本手法を適用した加工面には、図2で原理として提案した鉄の水酸化物の不導体被膜が生成されたと考えられる。

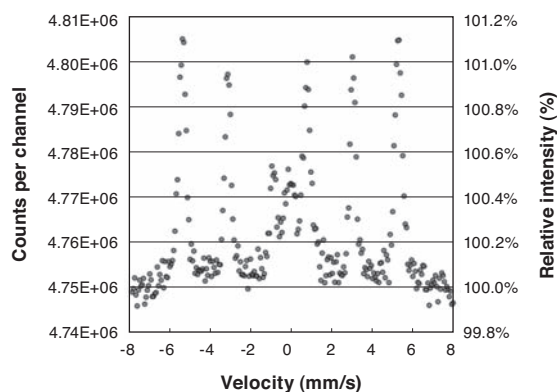


図9 メスバウアー分光分析のスペクトル

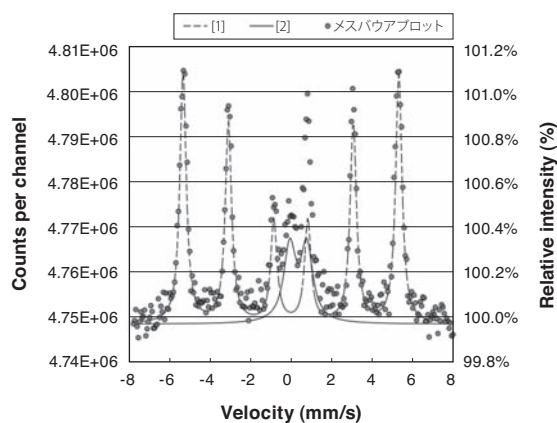


図10 スペクトルに対するフィッティングの結果

表3 メスバウアー分光スペクトルの解析結果

項目	δ (mm/s)	Δ (mm/s)	H (kOe)	帰属	
解析結果	[1]	+0.01	+0.00	324	α -Fe
	[2]	+0.38	0.84	0	表4記載

表4 解析結果[2]の帰属推定物質のメスバウアーパラメータ^{(12)、(13)}

化学式	δ (mm/s)	Δ (mm/s)	H (kOe)
β -FeOOH ⁽⁷⁾	+0.38	0.55	—
	+0.37	0.95	—
γ -FeOOH ⁽⁷⁾	+0.37	0.53	—
Ferrihydrite ⁽⁸⁾	+0.35	0.95	—

5. 絶縁再生研削法による防錆効果

絶縁再生研削法の適用により、高電気抵抗な加工面を有する圧粉磁心の作製が可能となる効果について詳述してきたが、表面改質効果により防錆力が向上した効果もこれまでに報告されている⁽⁹⁾。そこで本報においても、加工表面に鉄の水酸化物系の不導体被膜が生成された効果による防錆力の向

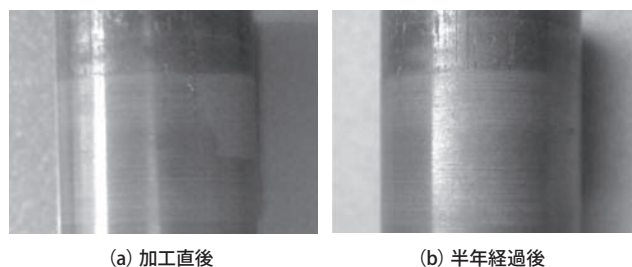


図11 大気放置試験前後の外観写真

上が期待できるため、大気暴露試験を通じて検証した。図11に本手法を適用して作製した圧粉磁心の加工直後、および半年経過後の外観を示す。図11(b)の半年経過の外観においても錆は全く確認されておらず、本手法を適用した圧粉磁心は高い防錆力を有していることが明らかとなった。

6. 結 論

筆者らは、電磁変換コイル用の圧粉磁心に対する仕上げ加工法として、ELID研削の表面改質機能を応用した絶縁再生研削法を開発した。本手法を適用することで、圧粉磁心の良好な電磁変換効率を損なうことのない仕上げ加工が可能である。以下に結論を示す。

- 1 圧粉磁心に一般的な研削加工で仕上げ加工を行うと、電磁変換効率が著しく低下する。この原因は、加工面の表層に導通層が生じて、電気抵抗が大幅に低下するためである。
- 2 絶縁再生研削法は、圧粉磁心を陽極に、導電性研削砥石を介した電極に陰極を接続して通電研削加工を行う手法である。本手法では、加工面に生じた導通層を電解除去し、かつ加工で削り取られた不導体被膜の再形成が可能である。この不導体被膜は鉄の水酸化物で高電気抵抗を示す。
- 3 開発手法で仕上げ加工を行った圧粉磁心は、加工前と同等の高い電気抵抗と低い鉄損特性を有し、その値は一般研削法の鉄損に対して約1/3に低減することが可能である。
- 4 開発手法を適用した圧粉磁心の加工表面は、大気放置試験において半年間経過後も錆が発生せず、高い防錆力を有している。

用語集

※1 ELID研削

電解インプロセスドレッシング (Electrolytic In-process Dressing) 研削の略称。鋳鉄や青銅等のメタル系ボンド砥石を加工中に常時電解ドレス(目立て)を行い、鋭利な切れ味を維持することにより、ガラスやセラミックスといった硬脆材料や難削材に対しても高能率かつ高精度な鏡面加工を実現する研削手法。

※2 スパークアウト

研削加工において、所定の寸法まで砥石を切り込んだ際に、砥石や被削材および加工装置の剛性不足等によって生じる切り残り量を、砥石に切り込みを与えずに所定の寸法位置で暫く停止させることにより、切り残り量を除去し被削材を所定の寸法に仕上げる加工、別名はゼロ研削。

参 考 文 献

- (1) T.Ishimine et al., Material Science Forum, Vol.534-536, pp.1333-1336 (2007)
- (2) 島田良幸ら、「高性能圧粉磁心材料の開発」、粉体および粉末冶金、Vol.53, No.8, pp.686-695 (2006)
- (3) 吉川浩平ら、「樹脂モールドリアクトルの開発」、SEIテクニカルレビュー第178号, pp.116-120 (2011)
- (4) 伊志嶺朝之ら、「高周波対応低ロス圧粉磁心材料の開発」、SEIテクニカルレビュー第166号, pp.1-6 (2005)
- (5) 新谷一博ら、「バイナダレスcBN工具における軟磁性材料の高速加工に関する研究」、精密工学会誌, 76 (7), PP.809-813 (2010)
- (6) H.Ohmori et al., "Advanced Ceramics Machining", CRC Press, pp.147-178 (2007)
- (7) 水谷正義ら、「電気化学反応を利用した表面改質加工技術に関する研究」、砥粒加工学会誌, Vol.48, No.7, pp.387-391 (2004)
- (8) 片平和俊ら、「DLC皮膜と超硬精密金型の密着性向上に果たす表面改質加工面の効果」、砥粒加工学会誌, Vol.49, No.3, pp.152-156 (2005)
- (9) T.Ueno et al., "Study on Electrolytic Re-insulation Grinding of Soft Magnetic Powder Cores", Advanced Materials Research, Vol.325, pp.264-269 (2011)
- (10) 上野友之ら、「電磁変換コイル用の圧粉磁心に対する絶縁再生研削法の研究」、ABTEC2011 砥粒加工学会学術講演論文集, pp.395-400 (2011)
- (11) K. M. Parida, "Studies on β -FeOOH part2 Physico-chemical characteristics of thermally treated akaganeite (β -FeOOH)", Journal of Materials Science, Vol.23, No.4, pp.1201-1205 (1988)
- (12) 佐野博敏ら、「メスパウアー分光学—基礎と応用—」、学会出版センター、東京 (1996)
- (13) D. C. Cook, "Conversion electron and X-ray M.S. of corrosion products", Hyperfine Interactions, 28, pp.891-894 (1986)
- (14) 片平和俊ら、「金属系生体材料 (SUS316) のELID研削特性と耐食性評価」、砥粒加工学会誌 Vol.46, Bo.5, pp.245-249 (2002)

執 筆 者

上野 友之* : 産業素材材料技術研究所 主査
圧粉磁心の材料およびプロセス開発に従事



松沼 健二 : 産業素材材料技術研究所 グループ長
西岡 隆夫 : 産業素材材料技術研究所 部長 工学博士

*主執筆者