

純鉄圧粉磁心の保磁力定量解析と材料開発への応用

高下 拓也* 中村 剛慶** 竹原万莉那**

1. はじめに

絶縁被覆を施した鉄粉などの軟磁性金属粉末を加圧成形して製造される圧粉磁心は、一般に以下のような特長を有する。

- ・フェライト等の酸化物系焼結磁心に比べると飽和磁束密度が高い
- ・電磁鋼板等の積層磁心に比べると渦電流損が低い
- ・三次元的に等方的な磁気特性を有している

このような特長から、近年高磁束密度化が指向され、且つ数kHz以上の高周波での低損失が要求されるインダクタやリアクトル⁽¹⁾、従来の鉄心では磁路形成が困難なアキシアルギャップモータ⁽²⁾等、幅広い領域での実用化が検討されている。上記のような利点を有する一方で、圧粉磁心は従来の鉄心と比較すると高ヒステリシス損であるという欠点がある。電磁鋼板と圧粉磁心の鉄損(単位重量当たりの損失である $W \text{ kg}^{-1}$ で表記)とその内訳を図1に示すが、圧粉磁心の鉄損の

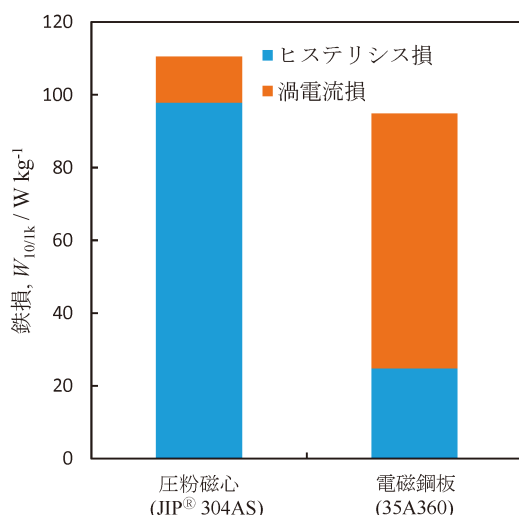


図1 圧粉磁心と電磁鋼板の鉄損。(オンラインカラー)

殆どをヒステリシス損が占めていることが分かる。特にモータのような比較的周波数が低いデバイスに使用した場合、ヒステリシス損が高いことが効率の低下に繋がる可能性がある。

ヒステリシス損は保磁力と比例関係にある⁽³⁾ため、ヒステリシス損の低減には保磁力の低減が重要となり、これまでも種々の検討が行われている⁽⁴⁾⁻⁽⁹⁾。しかしながら、いずれの検討もその低減メカニズムに関しては推定のみであるか、複数の要因が複合的に作用しているものが多く、定量的な議論が殆どなされていないのが現状である。著者はこれまでに圧粉磁心中の種々の微視組織因子が保磁力へ及ぼす影響の定量化を行っている。本報ではその検討の進捗と、本知見を活用した当社製品である絶縁被覆純鉄粉「電磁郎®」の開発について紹介する。

2. 圧粉磁心の微視組織と保磁力

圧粉磁心のような軟磁性材料の場合、デバイスに組み込まれた鉄心の実動作下での磁化は主に磁壁移動によって生じる。従って、保磁力の増加因子は磁壁移動の阻害因子、すなわち組織中の格子欠陥に起因すると考えられる。圧粉磁心の微視組織の模式図を図2に示すが、結晶粒界(粒子表面を含む)、塑性ひずみ(転位)、介在物および気孔などが圧粉磁心

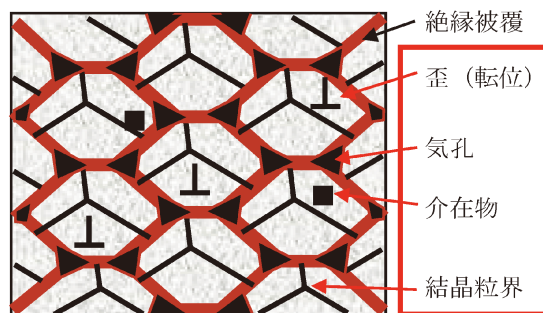


図2 圧粉磁心の微視組織の模式図。(オンラインカラー)

* JFE スチール株式会社スチール研究所機能材料研究部；主任研究員(〒260-0835 千葉市中央区川崎町一番地)

** JFE スチール株式会社スチール研究所機能材料研究部；研究員

Quantitative Analysis of Coercivity of SMC Core and Their Application to Materials Development; Takuya Takashita, Takechika Nakamura, Marina Takehara (Functional Material Research Department, Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, Chiba)

Keywords: iron powder core, soft magnetic composite (SMC), coercivity, iron loss, hysteresis loss, water atomized powder, eddy current loss

2022年10月26日受理[doi:10.2320/materia.62.132]

における微視組織中の格子欠陥であり、保磁力の増加因子と考えられる。圧粉磁心についてこれらの因子の寄与を個々に求めた研究例は少ないが、鋼板やバルク体を用いた検討は多く報告されている。以下では特に保磁力への寄与が大きい結晶粒界と塑性ひずみについて従来の知見と圧粉磁心への適用について述べる。

結晶粒界と保磁力の関係については Mager⁽¹⁰⁾が Yensen ら⁽¹¹⁾や Döring⁽¹²⁾の検討を基に結晶粒径の逆数に比例するモデル式を提案している。また、Pfeifer ら⁽¹³⁾、Herzer ら⁽¹⁴⁾および Yu ら⁽¹⁵⁾は Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Si および Fe-Ni-Mo-Cu を用いた検討により本モデルによる計算値が実験結果と良い一致を示すことを報告している。Pfeifer らによって SI 単位系に整理された Mager のモデル式は以下で示される。

$$H_{c,k} = \frac{3 \cdot \gamma}{I_s \cdot d_k} \quad (1)$$

ここで $H_{c,k}$ は結晶粒界に起因する保磁力、 I_s は磁性材料の飽和磁化、 d_k は結晶粒径、 γ は磁壁エネルギーである。本式

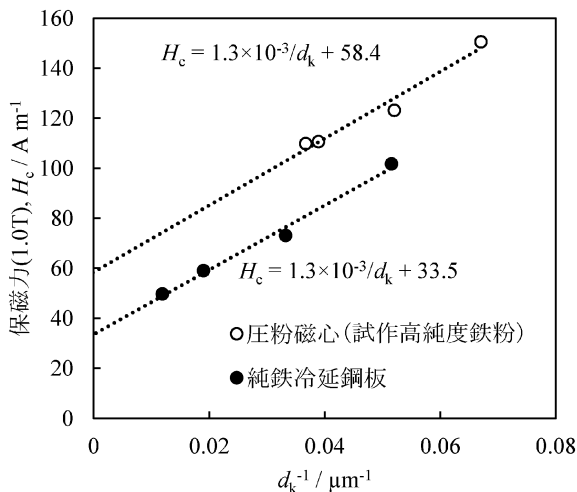


図3 結晶粒径の逆数と保磁力の関係。

を踏まえて、熱処理を行った純鉄の冷延鋼板と、原料鉄粉の粒子径が異なる圧粉磁心の平均結晶粒径の逆数と 1.0 T に励磁した際の保磁力の関係を図3に示す。いずれのプロットも極めて相関度の高い直線関係にあることが分かり、圧粉磁心においても Mager のモデルが適用可能であることが示唆される。また、回帰式の傾きを S とすれば、以下の式から実験的に磁壁エネルギーを求めることが出来る。

$$\gamma_{\text{obs}} = S \cdot I_s / 3 \quad (2)$$

ここで I_s は飽和磁化であり、純鉄の場合 2.16 T⁽¹⁶⁾となる。式(2)へ図3における圧粉磁心のプロットから得られる傾きを代入することで、 $\gamma_{\text{obs}} = 9.4 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$ が得られる。これは理論値から算出される純鉄の 90° 磁壁エネルギー ($8.4 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$) と 180° 磁壁エネルギー ($1.7 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$) のうち、90° 磁壁エネルギーに近い値であり、圧粉磁心の磁化が主として 90° 磁壁の移動により生じていることが示唆される。

保磁力に及ぼす転位の影響については、Kronmüller ら⁽¹⁷⁾が転位周りの応力場に起因した磁気モーメントの変化について検討を行い、Träuble⁽¹⁸⁾が更にこれを磁壁と転位の相互作用へと拡張し、保磁力との関係を導出している。Träuble が求めたモデル式は簡略化すると以下のように示される。

$$H_{c,\text{dis}} = \gamma_{\text{dis}} \cdot \rho_d^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $H_{c,\text{dis}}$ は転位密度に起因する保磁力、 ρ_d は転位密度、 γ_{dis} は磁歪、磁壁および転位の分布状態によって決まる係数である。転位や磁壁の分布状態を詳細に定量化するのは困難であるが、仮に γ_{dis} を定数とした場合、保磁力は転位密度の平方根に比例することが分かる。八重樫ら⁽¹⁹⁾は種々の引張変形が施された純鉄と実用鋼について、転位密度と保磁力の関係を実験的に求めており、いずれの鋼種においても式(3)の通り保磁力は転位密度の平方根に比例することを報告している。

上記の転位密度と保磁力の関係について、著者は熱処理温度の異なる圧粉磁心を用いた検討を行っている⁽²⁰⁾。熱処理温度を 673~973 K の間で変化させた圧粉磁心の SEM/EBSD 法により得た微視組織を図4に示す。図中の結晶粒

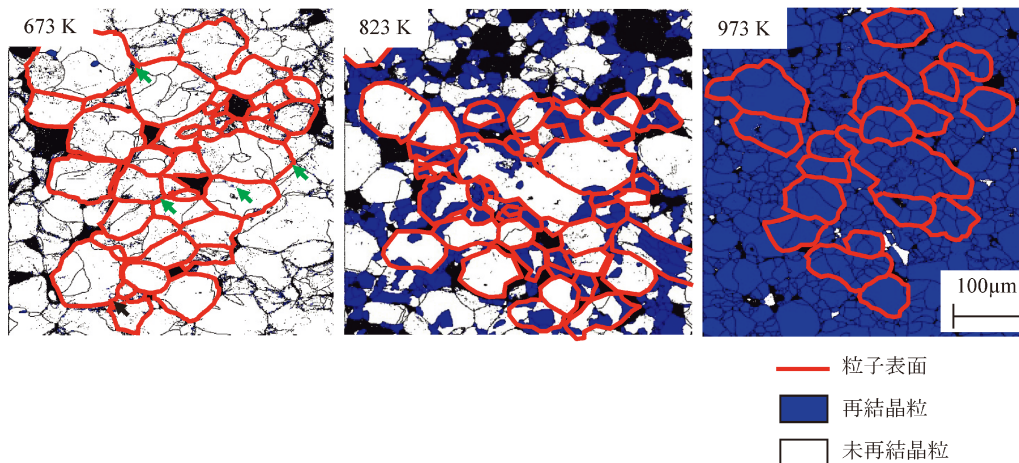


図4 SEM/EBSD 法によって得た圧粉磁心中の再結晶粒分布⁽²⁰⁾。(オンラインカラー)

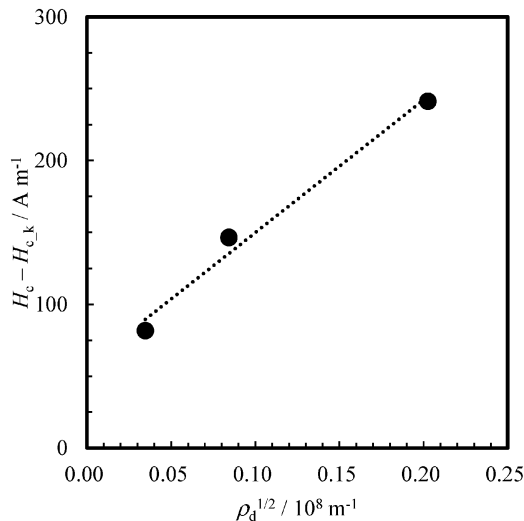


図5 転位密度の平方根と $H_c - H_{c,k}$ の関係⁽²⁰⁾.

は着色されたものが再結晶粒，未着色のものが未再結晶粒を示す．この図から分かるように熱処理による転位密度の低減は再結晶粒の生成，成長によって生じており，転位密度の変化とともに結晶粒径も変化している．そこで，各保磁力の増加因子には加算則が成立するとした Pfeifer ら⁽¹³⁾の検討をもとに，実測された保磁力と式(1)を用いて算出した結晶粒の寄与の差を，転位密度の平方根で整理した結果を図5に示す．プロットは相関度の高い直線関係にあり，回帰直線から $\gamma_{dis} = 9.2 \cdot 10^{-6}$ を得る．この値は過去の八重樫らの検討結果である $\gamma_{dis} = 6.5 \cdot 10^{-6}$ (八重樫らの検討は CGS 単位系での値であったため，本報では SI 単位系に換算して記載)⁽¹⁹⁾ と比べるとやや大きい，オーダーは一致しており，圧粉磁心においても式(3)を適用可能であることが示唆される．

以上のことから，圧粉磁心のような絶縁被覆された軟磁性粒子の集合体であっても，鋼板やバルク体を用いた検討で得た保磁力と微視組織の関係式を適用可能であることが示された．

3. 実用材の解析例

高城らは保磁力とヒステリシス損の関係を以下のように定式化している⁽³⁾．

$$W_h = \frac{4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot H_c}{\rho_c} \quad (4)$$

ここで， B は励磁磁束密度， f は励磁周波数， ρ_c は磁心の密度， c_h はヒステリシスループの形状によって決まる定数であり，圧粉磁心の場合おおよそ0.8程度となる⁽²¹⁾．保磁力を各寄与に分離すると以下のように書き換えることが出来る．

$$W_h = \frac{4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot (H_{c,k} + H_{c,dis} + H_{c,ex})}{\rho_c}$$

$$W_h = \frac{4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot H_{c,k}}{\rho_c} + \frac{4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot H_{c,dis}}{\rho_c}$$

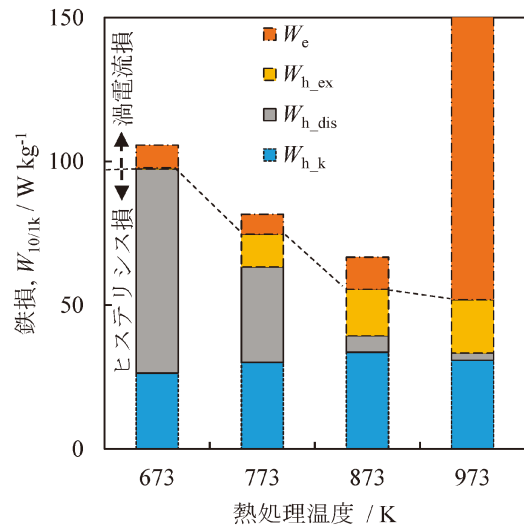


図6 圧粉磁心の熱処理温度と鉄損の関係．(オンラインカラー)

$$+ \frac{4 \cdot c_h \cdot B \cdot f \cdot H_{c,ex}}{\rho_c} \quad (5)$$

$$W_h = W_{h,k} + W_{h,dis} + W_{h,ex}$$

ここで， $W_{h,k}$ は結晶粒界に起因するヒステリシス損， $W_{h,dis}$ は転位密度に起因するヒステリシス損， $W_{h,ex}$ はそれ以外の因子に起因する保磁力をそれぞれ示す．本式を用いることで，式(1)および(3)にて微視組織解析により見積もった保磁力からヒステリシス損への拡張が可能となる．一例として高純度純鉄粉(平均粒子径 $76 \mu\text{m}$)を用いて作製した圧粉磁心の鉄損を，式(5)を用いて分離した結果を図6に示す⁽²¹⁾．熱処理温度の上昇と共に $W_{h,dis}$ は減少し，873 K 以上では飽和している．また，973 K では渦電流損が急激に増加しているが，これは熱処理温度の上昇に伴う絶縁被覆の破壊に起因するものである．鉄損が最小となる873 Kに着目すると，鉄損の半分以上を $W_{h,k}$ ，すなわち結晶粒界に起因するヒステリシス損が占めていることが分かる．このことから，圧粉磁心の鉄損低減には $W_{h,k}$ の低減が極めて重要であると言える．

結晶粒界起因のヒステリシス損 $W_{h,k}$ の低減の為には式(1)から分かるように結晶粒径の粗大化が必要となる．結晶粒径の粗大化には一般的に熱処理温度の高温化や，原料鉄粉の粒子径の粗大化等が有効であるが，一方で過度な熱処理温度高温化や粒子径粗大化は渦電流損の増加を招き，「低渦電流損」という圧粉磁心の特長を損ねてしまう⁽²²⁾⁻⁽²³⁾．渦電流損の増加を伴うことなく保磁力を低減する手法として，著者らは過去に粒子の球形化による結晶粒粗大化を報告している⁽²⁴⁾．本知見をもとに粒子球形化によるヒステリシス損低減を指向した商品の例が絶縁被覆純鉄粉「電磁郎®」である．電磁郎®の粒子形状を図7に，鉄損の評価結果を図8に示すが，粒子を一部球形化することで，渦電流損の増加無しにヒステリシス損の大幅な低減に成功し，電磁鋼板と同等レベルの鉄損を達成している．

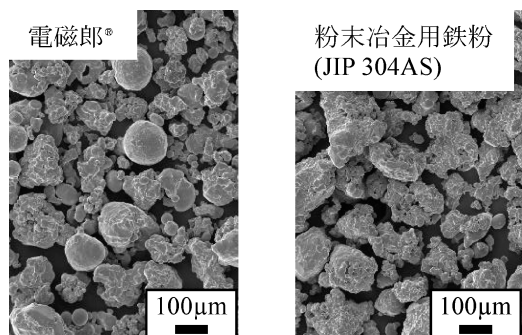


図7 電磁郎®および粉末冶金用鉄粉の粒子外観(SEM 像)。

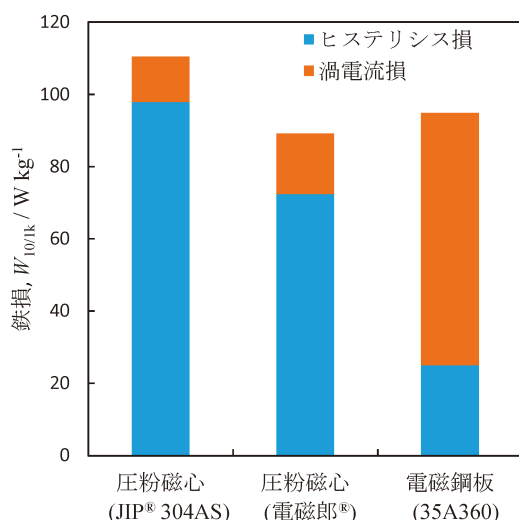


図8 電磁郎®および粉末冶金用鉄粉からなる圧粉磁心と電磁鋼板の鉄損。(オンラインカラー)

上記のようにヒステリシス損のみを低減することによる副次的な効果として、実動作下を模擬した励磁条件での損失低減が挙げられる。近年、半導体技術の発達によりモータを可変速にするためにインバータを搭載する例が増えている。インバータで直流から交流を合成する場合、波形には半導体のスイッチングに起因した高調波が重畳する⁽²⁵⁾。従って、インバータ励磁下の鉄心材料には高調波に起因した損失の低減が求められる。インバータの方式にもよるが、高調波は半導体のスイッチング周波数(キャリア周波数)の1~2倍の周波数を有している。モータの駆動に必要な交流周波数が~1 kHzであったとしても、その波形を合成するために~20 kHzでの半導体スイッチングを行う必要があり、これによりキャリア周波数と同等以上の高調波が交流波形に重畳することとなる。渦電流損は一般に周波数の二乗に比例するため⁽²⁶⁾、高調波の大部分は渦電流損であると言われている⁽²⁷⁾。SiCの単相インバータを用いて電磁郎®からなる圧粉磁心と電磁鋼板の鉄損を評価した結果を図9に示す。インバータ励磁の場合、鉄損は渦電流損失、ヒステリシス損失に加え、高調波に起因する高調波損からなる。図から分かるように、電磁郎®からなる圧粉磁心は電磁鋼板に比べ高調波損が顕著に

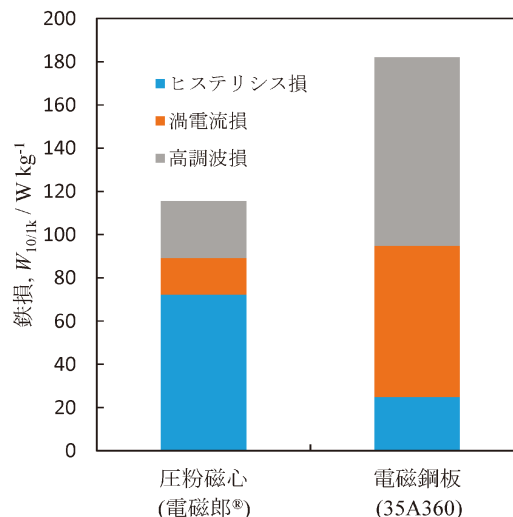


図9 電磁郎®からなる圧粉磁心と電磁鋼板のインバータ損 (インバータ条件: 変調率0.4, キャリア周波数20 kHz)。(オンラインカラー)

小さい。このような実動作を模擬した条件下での損失低減が、インバータ波形で駆動するモータ等の効率向上に寄与することが期待される。

4. まとめと今後

以上、純鉄圧粉磁心の保磁力の定量解析と、その知見をもとにした実用材の開発事例について簡単に紹介した。保磁力の定量解析について、著者らは介在物や気孔の寄与に関する検討も実施しているが、完全な定式化には至っていないのが現状である⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾。また、今回は各保磁力の寄与の間に加算則が整理するという仮定のもとで解析を行ったが、鉄鋼材料の強化機構でも議論されているように、各微視組織因子について加算則を行うことの妥当性も併せて検証する必要がある⁽³⁰⁾。これらを明らかにすることで、圧粉磁心の保磁力に対しての理解が進み、更なる低損失化が進むことが期待される。

文 献

- (1) 杉山昌揮, 山口登志也, 大河内智, 岸本秀史, 服部 毅, 齋藤貴伸: 素形材, **51**(2010), 24-29.
- (2) 齋藤達哉, 榎園勇太, 東 大地, 伊志嶺朝之, 上野友之, 中村悠一, 奥野麗子: 住友電工テクニカルレビュー, **198**(2021), 41-46.
- (3) 高城重彰, 清田禎公: 日本金属学会会報, **29**(1990), 141-146.
- (4) 北条啓文, 赤城宣明, 澤山哲也, 三谷宏幸: 神戸製鋼技報, **60**(2010), 79-83.
- (5) T. Maeda, H. Toyoda, N. Igarashi, K. Hirose, K. Mimura, T. Nishioka and A. Ikegaya: SEI Tech. Rev., **60**(2005), 3-9.
- (6) T. Maeda, A. Sato, Y. Mochida, H. Toyoda, K. Mimura and T. Nishioka: Proc. Powder Metallurgy World Congress, Korean Powder Metallurgy Inst., (2006).
- (7) 田島 伸, 服部 毅, 堀田昇次, 近藤幹夫, 岡島博司, 東山

- (26) 太田恵造: 磁気工学の基礎, 共立出版, (1973), 311.
- (27) 和嶋 潔, 平山 隆, 大杉保郎: 新日鐵住金技報, **411** (2018), 126-132.
- (28) 高下拓也, 尾崎由紀子: 粉体および粉末冶金, **68** (2021), 20-27.
- (29) T. Takashita and Y. Ozaki: J. Magn. Magn. Mater., **535** (2021), 167992.
- (30) 紙川尚也, 宮本吾郎, 古原 忠: まてりあ, **54** (2015), 3-11.

★★



竹原万莉那