EV 化社会に向けたパワーエレクトロニクス用軟磁性材料研究

圧粉磁心と純鉄粉

~鉄損に及ぼす粉末特性の影響~

高 下 拓 也^{*}₁ 平谷多津彦^{*}₂ 宇 波 繁^{*}₃

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現へ向けた電力変換技術 (パワーエレクトロニクス)の発展において、軟磁性材料はキ ーとなる素材である.軟磁性材料は主に巻線を施し磁心とし て用いられ、用途に応じ、電磁鋼板を積層した積層磁心、フ ェライト等の酸化物系焼結磁心、更に絶縁被覆を施した軟磁 性金属粉末を加圧成形して製造される圧粉磁心等が用いられ る.その中でも圧粉磁心は原料となる軟磁性粉末の粉末特性 や組成を制御することで、幅広い周波数に対応可能な磁心で ある.純鉄粉を原料とする純鉄系圧粉磁心は、

 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

といった特長から,近年,高磁束密度化が指向され,かつ数 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ャルギ 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.

純鉄系圧粉磁心は上述のようなメリットを有する反面,そ の性能を最大限に引き出すためには,原料となる鉄粉の粉末 特性を目的に応じて適正化することが必要となる.また,鉄 粉の粉末特性はその製造方法と密接に関連していることか ら,目的の粉末特性の鉄粉を選定する上では,鉄粉の製造方 法とそれによって得られる粉末特性についての理解が重要で ある.本報では,鉄粉の製造方法で最も一般的であるアトマ イズ法に着目し,粉末特性に及ぼすアトマイズ製造条件の影 響について概説する.更に,磁気特性のうち電力変換効率に 直結する指標である鉄損へ着目し,粉末特性と鉄損の相関に ついて,いくつかの検討例を報告する.

2. 鉄粉の製造方法

(1) 鉄粉製造方法の分類

鉄粉の製造方法を表1にまとめて示すが、大きくは化学的 反応法とアトマイズ法の2種類に大別される.化学的反応 法には酸化鉄 還元法, 電気分解法およびカルボニル法があ る.酸化鉄還元法で得られる鉄粉(還元鉄粉)は平均粒子径が 数十 μm であり,かつ内部に数 μm の気孔を含む⁽³⁾. このよ うな粉末を用いて作製した圧粉磁心は高周波のノイズフィル タリング用として使用されることがある⁽⁴⁾.しかしながら, 多孔質であることに起因し、磁心の磁束密度を高めることが 困難であるため、近年の小型・高磁東密度化ニーズに対応す ることが困難である. 電気分解法で得られる粉末は樹枝状 で,極めて粒子形状の異方性が高い.磁性材料として使用さ れる例は少ないが、純度が高いため後述のアトマイズ法にお ける原料として用いられることがある. カルボニル法で得ら れる鉄粉は粒子径が極めて小さく,球形状をしている. 粒子 径が小さいほど高周波での鉄損は小さくなることから, MHz帯でインダクタへの適用が検討されている⁽⁵⁾.一方で 粗粒化が困難であるため、周波数が低い領域で用いるのは適 切ではない.なお,鉄損に及ぼす粒子径の影響については後

表1 鉄粉の製造方法.

原理	手法	
化学反応	酸化鉄還元法 <u>ミルスケール</u> 鉄鉱石	
	電気分解法	
	カルボニル法	
アトマイズ	ガスアトマイズ	
	水アトマイズ	
	遠心アトマイズ	

* JFE スチール株式会社スチール研究所(〒260-0835 千葉市中央区川崎町一番地)

1) ステンレス鋼・鉄粉研究部;主任研究員 2) サステナブルマテリアル研究部;主任研究員 3) ステンレス鋼・鉄粉研究部;部長 Influence of Powder Properties on Iron Loss of Soft Magnetic Composite Cores; Takuya Takashita, Tatsuhiko Hiratani and Shigeru Unami (*Stainless Steel & Iron Powder Research Dept., 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* 2023年4月25日受理[doi:10.2320/materia.62.582] 述する.

以上のように,化学的反応法で得られる粉末は多孔質であ る等,形状が特殊であるか,粒径を任意に制御するのが困難 であるため,その適用先は限定的である.それに対し,アト マイズ法は製造条件の適正化により任意に粒径や形状が制御 可能な技術である.以下では代表的なアトマイズ法であるガ スアトマイズ法と水アトマイズ法について,その概要と得ら れる粉末の特長について述べる.

(2) ガスアトマイズ法

水アトマイズ法やガスアトマイズ法はタンディッシュに設置された溶湯ノズルより落下させた溶融金属を、高圧の水もしくはガスにより分断し金属粉末を得る手法である(図1). ガスアトマイズ法の場合、金属粉末の酸化を防止するため、 ガスには Ar や N₂等の不活性ガスが用いられることが多い⁽⁶⁾.高圧ガスにより分断された溶融金属液滴は自由落下の 過程で凝固するが、その過程で表面張力により球形化する. そのため、ガスアトマイズにより得られる粉末は図2に示す ように粒子円形度が高いことが特徴である.

一方,ガスアトマイズによって得られる金属粉末の平均粒 子径は種々の製造因子によって変化する.その関係は Lubanska⁽⁷⁾によって実験的に以下のように整理されている.

$$d_{50} = K \cdot D_{\rm n} \left\{ \frac{\nu_{\rm m}}{\nu_{\rm g} \cdot W_{\rm e}} \left(1 + \frac{M_{\rm m}}{M_{\rm g}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

ここで、 d_{50} は金属粉末のメジアン径、Kは実験定数、 D_n は 溶湯ノズル径、 v_m および v_g はそれぞれ溶融金属およびガス の動粘性係数、 M_m および M_g はそれぞれ溶融金属およびガ スの流量、 W_e はウェーバー数である、ウェーバー数は更に 以下のように表すことができる.

$$W_{\rm e} = \frac{\rho_{\rm m} D_{\rm n} V_{\rm g}^2}{\sigma_{\rm m}} \tag{2}$$

ここで、 ρ_m は溶融金属の密度、 V_g は溶融金属に衝突する際のガス速度、 σ_m は溶融金属の表面張力である. 任意の溶融金属を任意のガスにて分断し粉末を製造する場合、 ν_m 、 ν_g 、 ρ_m および σ_m は定数となると考えると、その微粒化には溶湯ノズル径の減少、ガス流量の増加、溶融金属流量の減少およびウェーバー数の増加を指向する必要があることが本式から分かる.

ガスアトマイズ法によって得られる鉄粉は、粒子円形度が 高いことから、粉末の流動性が高い.そのため、近年急速発



図1 水アトマイズ法およびガスアトマイズ法の概略.(オン ラインカラー)



図2 ガスアトマイズ鉄粉.

展している積層造形技術⁽⁸⁾に用いられる例が増加している. また,粒子円形度が高い粉末を用いて作製した圧粉磁心は磁 気飽和しにくいため,高磁場下で使用されるインダクタやリ アクトル等に用いられている⁽⁹⁾.一方で,後述する水アトマ イズ法と比較すると得られる鉄粉の粒子径が粗い.詳細は後 述するが,近年のインダクタやリアクトルは高周波での鉄損 低減が求められており,高周波での鉄損低減のためには原料 粉末微粒化が指向される.そのため,微粒粉末製造への対応 が今後のガスアトマイズ法の課題となる.

(3) 水アトマイズ法

溶融金属の分断を高圧ガスで行うガスアトマイズ法に対 し,水アトマイズ法では高圧水を用いる.高圧水を用いるた め,ガスアトマイズ法と比較して,溶融金属の冷却速度が速 くなる.そのため,分断された溶融金属液滴は表面張力で球 形化する前に凝固し,粒子形状は図3に示すように不定形と なる.

水アトマイズ法によって得られる金属粉末は一般にガスア トマイズ法で得られる粉末と比較して微粒である⁽¹⁰⁾が,以 下の二点がその理由である.一つ目の理由は溶融金属の分断 に使用する流体の動粘性係数の違いである.Lubanskaの実 験式(式(1))からも分かるように,金属粉末の粒子径は粉 砕に用いる気体の動粘性係数によって変化する.液体の動粘 性係数は気体の動粘性係数と比較すると高いため,式(1) におけるガスの動粘性係数項である νg は水を用いることに



図3 水アトマイズ鉄粉.

より大きくなる.動粘性係数項 ν_g は右辺の分母に位置する ため、水を用いることでガスに比べて動粘性係数項が大きく なり金属粉末の粒子径は減少する.

二つ目の理由はガスアトマイズ法と比較して水アトマイズ 法の分断メカニズムが多岐にわたる点である. Hikita ら⁽¹¹⁾ は高速度カメラを用いた高圧水噴霧による溶融金属の分断挙 動の可視化を行っているが、その分断メカニズムは(a) Bursting water, (b) Droplet ejection および(c) Ligament separation 03タイプに分類されるとしている. このうち, (c)はガスアトマイズにおける溶融金属の分断メカニズムと 同じものであるが、(a)および(b)は高圧水を用いることに よって生じる固有の現象である. さらに, (a)および(b)は (c)と比較して極めて微細な溶融金属液滴が生成される. Hikita らの検討では(a)および(b)によって生成される金属 微粒子の生成量は(c)に比べて少量であり、金属粉末の平均 粒子径に及ぼす影響は小さいとしているが、水アトマイズの 条件によっては上記金属微粒子の生成が平均粒子径の減少に 寄与することは十分に考えられる. 仮に高圧水による溶融金 属分断が主として(c)によって生じるとした場合の粒子径予 測式は Hikita らによって下式のように導出されている⁽¹²⁾.

$$d_{32} \sim \frac{D_{\rm n}}{\sin \theta} \left\{ \frac{\rho_{\rm m}}{\rho_{\rm w}} \cdot W_{\rm e} \right\}^{-\frac{1}{3}} \tag{3}$$

ここで、 d_{32} はザウター径、 θ は溶融金属の落下方向と噴霧 水の噴射方向がなす角度、 ρ_w は水の密度である. Lubanska の実験式(式(1))と比較すると用いる物性値はやや異なる ものの、溶湯ノズル径の減少およびウェーバー数の増加に伴 い粒子径が減少するという点は一致している.

水アトマイズ法によって得られる粉末の多くは焼結部品に 使用されている.粉末冶金法は,粉末を加圧成形した圧粉体 を融点以下の温度で焼結させることによりニアネットシェイ プ形状の部品を製造する手法である.加圧成形後の圧粉体は 焼結炉まで搬送されるが,

圧粉体の強度が低いと搬送中に破 損してしまう. 粒子形状の不定形化により, 成形時に粒子同 士の絡み合いが生じ圧粉成形時の強度が高まる. そのため, 焼結部品向けには水アトマイズ法で製造された金属粉末が使 用されることが多い. このような高い圧粉体強度は, 圧粉磁 心をモータ鉄心のような可動部へ適用する場合に有効であ る. また, 前述のように粒子の微粒化が可能なため, 近年高 周波向けの圧粉磁心への水アトマイズ粉の適用が増加してい る.また,水アトマイズ法を発展させることで,ガスアトマ イズ法に匹敵する粒子円形度の粉末も製造可能となってお り(13),ガスアトマイズ法に比べると、粒子形状や粒子径を 制御する、という観点では汎用性が高い技術と言える.

一方で、その製法上、溶融金属が必ず水と接するため、水 により金属粉末が酸化してしまうという課題がある.純鉄粉 のような酸化物の還元が容易な金属粉の場合、水アトマイズ 後に水素中で還元熱処理を行うことで酸素の低減が可能であ る⁽¹⁴⁾.しかしながら、軟磁気特性に優れる金属粉末である Fe-Siやセンダスト(Fe-Si-Al)のように合金組成にSiやAl が含まれる場合、酸化が生じるとその還元が困難となるため 水アトマイズ法を適用した例は少ない.従って、金属粉末の 酸化防止技術の発展による適用可能金属組成の拡大が水アト マイズ法における今後の課題である.

3. 圧粉磁心の鉄損に及ぼす粉体特性の影響

(1) 圧粉磁心の製造工程と微視組織

臣粉磁心の製造工程を図4,微視組織の模式図を図5に示す.原料は絶縁被覆を施された鉄粉である.この絶縁被覆鉄粉を加圧成形し,蓄積された塑性ひずみを除去するためにひずみ取熱処理が施され,圧粉磁心となる.圧粉磁心は焼結部品と異なり,焼結による金属粒子同士の結合が生じないため,原料粉末の粉体特性が最終製品である圧粉磁心の磁気特性へ大きな影響を及ぼす.ここでは代表的な粉末特性である粒子径と粒子形状に着目し,圧粉磁心の鉄損へ及ぼすその影響について述べる.

(2) 粒子径の影響

鉄損とは磁性材料を交流磁界においた際に生じる損失であり,一般に以下のように表される.

$$W = W_{\rm hys} + W_{\rm eddy} \tag{4}$$

ここで Wは鉄損, W_{hys} はヒステリシス損, W_{eddy} は渦電流 損である.ヒステリシス損は更に以下のように表すことが出 来る⁽¹⁵⁾.

$$W_{\rm hvs} = C_{\rm h} f B^{1.6}$$
 (5)

ここで、fは励磁周波数、Bは励磁磁束密度、 C_h は材料係数 である、 C_h は微視組織によって変化する、微視組織因子と しては結晶粒径の寄与が最も大きく、また、ヒステリシス損 は結晶粒径の逆数と線形関係にある⁽¹⁶⁾、更に、結晶粒径は 粉末粒子径増加に伴い増加する傾向にある⁽¹⁷⁾ことから、 $C_h \propto 1/d_{50}$ とすると、式(5)は以下のように整理できる。





図5 圧粉磁心の微視組織. (オンラインカラー)

$$W_{\rm hys} = C_{\rm h}/d_{50} \cdot f \cdot B^{1.6}$$
 (6)

一方,渦電流損は以下のように表すことが出来る.

 $W_{
m eddy} = W_{
m e_intra} + W_{
m e_inter}$ (7) ここで $W_{
m e_intra}$ は粒内渦電流損, $W_{
m e_inter}$ は粒間渦電流損であ

り、いずれも磁東密度および周波数の二乗に比例する.また、粒内渦電流損は平均粒子径 d_{50} の二乗に比例し、粒間渦電流損は圧粉磁心の比抵抗 ρ_{bulk} の逆数に比例する⁽¹⁸⁾ため、式(7)は更に以下のように表すことが出来る.

 $W_{\text{eddy}} = (C_{\text{e1}}/\rho_{\text{bulk}} + C_{\text{e2}} \cdot d_{50}^2) \cdot f^2 \cdot B^2$ (8) ここで C_{e1} は鉄心の断面積によって決まる定数, C_{e2} は粉末

の比抵抗によって決まる定数である.式(6)および式(8) を式(4)に代入すると,

 $W = c_h/d_{50} \cdot f \cdot B^{1.6} + (C_{e1}/\rho_{bulk} + C_{e2} \cdot d_{50}^2) \cdot f^2 \cdot B^2$ (9) 上式より d_{50} 以外を定数とした場合, d_{50} が小さくなると $W_{hys} を変形した右辺第一項が増加し, W_{eddy} を変形した右$ 辺第二項が減少する, すなわち Wは任意の粒子径で極小値を持つことが分かる.

以上のように鉄損が極小値をもつ一例として、d₅₀の異な る原料鉄粉を用いた圧粉磁心の鉄損(励磁磁束密度1.0T, 励磁周波数 400 Hz)を図 6 に示す.鉄損 Wは d₅₀ がおおよ そ107µm で極小値を示し,更に d₅₀の減少により W_{eddv} が 減少し、 $W_{\rm hys}$ が増加していることが分かる. また、 $W_{\rm hys}$ お よび Weddy は励磁条件に対する依存性もそれぞれ異なること から, 励磁磁束密度や励磁周波数によっても鉄損が極小とな る d₅₀ は変化する. その例として, 励磁磁束密度を 1.0 T と し、周波数を 50 Hz および 1 kHz とした際の平均粒子径 d50 と鉄損の関係を図7および図8に示すが周波数の増加に伴 い,鉄損が極小となる d50 が小さくなっていることが分か る. 式(5)および式(8)からわかるように、ヒステリシス 損 W_{hys} は周波数fに比例するのに対し、渦電流損 W_{eddy} はfの二乗に比例する.そのため、周波数増加に伴う損失の増加 量は渦電流損の方が大きく、これにより高周波側では渦電流 損が小さくなる小粒子径側へ鉄損の極小値は変化する.近 年、半導体技術の発達により電子回路のスイッチング周波数 は高周波化する傾向にある. これは励磁周波数の高周波化を 示唆しており, 電子回路に組み込まれる磁気部品の損失低減 の観点からは、今後ますます圧粉磁心用原料鉄粉に対する微 粒化ニーズは高まってくるものと予想される.



図6 原料鉄粉粒子径と鉄損の関係(400 Hz). (オンラインカラー)



図7 原料鉄粉粒子径と鉄損の関係(50 Hz). (オンラインカラー)



図8 原料鉄粉粒子径と鉄損の関係(1kHz).(オンラインカラー)

(3) 粒子形状の影響

鉄粉の粒子形状を示す指標は種々提案されているが、ここでは粉末特性の評価指標としてよく用いられる見掛密度を粒 子形状の指標とし、圧粉磁心の鉄損との関係を調査した.調 査に用いた原料鉄粉の粉末特性および粒子断面の光学顕微鏡 写真を図9に示す.これらの鉄粉は全て水アトマイズ法によ り作製されたものとなる.粉末特性に着目すると、粒度およ

粒子形状	見掛密度, AD / Mg m ⁻³	平均粒子径, <i>d</i> ₅₀ /μm
A	4.07	
B	3.57	81
С 25 µm	3.19	

図9 粒子形状の異なる粉末の粒子断面と粉末特性.

び平均粒子径はほぼ同等であるが,見掛密度が大きく異なっ ている.粒子断面に着目すると,見掛密度が高いほど粒子断 面が真円形状に近づいていることが分かる.また,鉄粉中の 平均結晶粒径は全て39~41 µmの範囲内となっていた.こ のような3種類の鉄粉に対して絶縁被覆を施し,980 MPa に て加圧成形した後に973 K でのひずみ取熱処理を行った際 の鉄損を図10に示すが,見掛密度の増加に伴い鉄損が減少し ており,これは渦電流損とヒステリシス損の両方の低減によ るものであることが分かる.

粒子形状によって渦電流損が変化する理由は以下のように 考えられる.粒子間が完全に絶縁されている場合,式(8) の右辺第一項の粒間渦電流損項はゼロとみなして無視するこ とが出来るが,何らかの理由で絶縁被覆が破壊された場合, 粒子間が短絡することにより圧粉磁心の比抵抗が低下,渦電 流損は急激に増加する⁽¹⁸⁾. 圧粉磁心の比抵抗と渦電流損の 関係を図11に示すが,式(8)に示されたように,比抵抗の 逆数に比例して渦電流損が増加していることが分かる.この ような粒子形状による比抵抗の変化は,圧粉磁心の製造工程 における加圧成形に起因していると推定される.見掛密度が 低い粉末は,加圧成形時の粒子表面の塑性変形量が多いた め,絶縁被覆が破壊され,成形体の比抵抗が低下し,結果と して渦電流損が増加してしまうのである.

ヒステリシス損の低減についても,基本的には上記の塑性 変形量の低減に起因するものである.本検討に用いた圧粉磁 心の,未熱処理および 973 K 熱処理後の微視組織中のひず み分布を可視化したものを図12に示す.未熱処理材のひずみ 分布に着目すると,原料粉末の見掛密度が低いものほど高い ひずみが蓄積されていることが分かる.また,973 K 熱処理 材は成形時に蓄積されたひずみがほぼ低減されていることが 分かる.また,973 K 熱処理材の光学顕微鏡による微視組織 観察結果と,結晶粒径測定結果を図13に示すが,973 K 熱処 理材では見掛密度の低い原料を用いたものほど結晶粒が小さ くなっている.金属材料の熱処理中に生じるひずみの低減 は,回復と再結晶の2 段階に分けられる.再結晶は熱処理





図11 圧粉磁心の比抵抗と渦電流損の関係(400 Hz).(オンラ インカラー)

中にひずみの無い新しい結晶が核生成,粒成長していく現象 であるが,熱処理前のひずみが少ない方が再結晶中に生じる 核の量が少なく,結晶が成長し易いため再結晶後の結晶粒径 が大きくなることが経験的に言われている⁽¹⁹⁾.前述のよう にヒステリシス損は結晶粒径の逆数と線形関係にあるため, このような再結晶後の結晶粒径差がヒステリシス損を低減し たものと考えられる.

以上のように,鉄損低減の観点からは原料粉末の見掛密度 の増加,すなわち粒子形状の球形化は極めて有効である.そ の一方で,一部の磁気部品においては必ずしも鉄損のみを優 先しない例がある.例えば,車載リアクトル用の原料鉄粉の 開発事例では,ガスアトマイズのような球形度の高い粉末で はなく,やや形状が不定形な粉末を採用している⁽¹⁾.粒子の 球形化は鉄損低減に効果がある一方,鉄心中の粒子同士の絡 み合いが弱いため,機械的な強度が低い.そのため,車載に 耐え得る鉄心強度と鉄損低減の観点から上記のような粒子形 状を原料粉末に採用しているのである.このように,粒子形 状についても,鉄損低減のみを目指して球形化を志向するの ではなく,それ以外の目標特性とのバランスを考慮して最適 値を選定する必要がある.



図12 圧粉磁心の微視組織中のひずみ分布. (オンラインカラー)



4. おわりに

以上,軟磁性金属粉末を対象としてその製造方法と磁気特 性に及ぼす粉末特性の影響について概説した.粉末の製造方 法としては主としてガスアトマイズ法と水アトマイズ法の二 種類が存在する.それぞれに利点と欠点が存在し,目的とす る粉末特性に応じた手法を選定する必要がある.また,軟磁 性金属粉末の代表的な使用例である圧粉磁心について鉄損に 及ぼす,原料粉末の粒子径と粒子形状の影響を渦電流損とヒ ステリシス損に分けてそれぞれ解説した.粒子径,粒子形状 共に目的に応じた適正値が存在し,それに対応した粉末の選 定が圧粉磁心の鉄損低減のためには重要である.

近年、電子回路技術の進歩に伴い、鉄心材料への要求は益

々高度化している.電子回路の中でも特にパワーエレクトロ ニクスの分野では,技術発展の律速過程が軟磁性材料の開発 にあるとも言われている.その一方で,圧粉磁心の鉄損に対 しては,利用する側の理解が進んでいるとは言い難く,目的 に対して不適切な粉末を使用している例も存在するように感 じられる.本報で紹介した内容が適切な原料粉末選定の一助 となれば幸いである.

文 献

- (1) 杉山昌揮,山口登志也,大河内 智,岸本秀史,服部 穀, 齋藤貴伸: SOKEIZAI, 61 (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: 住友電エテクニカルレビュー, 198 (2021), 41-46.
- (3) 森岡恭昭:第82-83回西山記念講座,日本鉄鋼協会,(1982), 11-38.
- (4) 定廣健一,後藤聡志,上ノ薗 聡: JFE 技報,8(2005),1-6.
- (5)小枝真仁,原田明洋,小野裕之,石倉友和,黒田朋史,茂呂 英治:電気学会論文誌 A, 131(2011),949-954.
- (6) 川村 誠, 大河内敬雄: 電気製鋼, 141(2021), 139-145.
- (7) H. Lubanska: JOM, **22**(1970), 45–49.
- (8) 京極秀樹:まてりあ, 57(2018), 140-144.
- (9) 相川芳和:特殊鋼, 68(2019), 30-32.
- (10) 森岡恭昭:第82-83回西山記念講座,日本鉄鋼協会,(1982), 11-38.
- (11) W. Hikita, S. Hirayama, C. Inoue, Z. Wang, M. Nakaseko and T. Takashita: Powder Technol., **32**(2022), 117778.
- (12) W. Hikita, T. Ichimura, C. Inoue and M. Nakaseko: Adv. Powder Technol., **32**(2021), 4235–4244.
- (13) 菊川真利,松永繁昌,稲葉恒太,岩津 修,武田 徹:粉体 および粉末冶金,47(2000),453-457.
- (14) 大塚和弘, 樋口和男, 園部秋夫: JFE 技報, 36(2015), 51-56.
- (15) C. P. Steinmetz: IEEE Spectrum, 2, April (1965), 82-95.
- (16) A. Mager: Annalen der physic, **6**(1952), 15–16.
- (17) 高下拓也,中村尚道,尾崎由紀子:JFE 技報,36(2015),75-81.
- (18) 武本 聡, 藪見崇生, 齋藤貴伸: 電気製鋼, 76(2005), 165-170.
- (19) 古林英一:再結晶と材料組織,内田老鶴圃,(2000),190-207.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★ 高下拓也

2009年3月 九州大学大学院総合理工学府修士課程修了 2009年4月-2011年3月 JFE スチール(㈱スチール研究所電磁鋼板研究部 2011年4月-2021年3月 同社鉄粉・磁性材料研究部 2021年4月-2023年3月 同社機能材料研究部

- 2021年9月 九州大学大学院工学府博士課程修了
- 2023年4月 現職
- 専門分野:軟磁性材料,粉末冶金,金属組織学

◎軟磁性材料および鉄系金属粉末の製造プロセス開発,材料開発および利用 技術開発に従事。





平谷多津彦



宇波 繁