

軟磁性材料の開発動向と展望

吉 沢 克 仁*

1. はじめに

軟磁性材料(ソフト磁性材料)は、モータ、トランスや電源など多くの電気機器の磁心(鉄心)材料として使用されており、私たちの生活に欠かすことができない存在である。軟磁性材料には、電気機器を小型化するため飽和磁束密度(B_s)が高いこと、電気機器の損失低減のために透磁率(μ)が高く保磁力(H_c)が低く磁化曲線のヒステリシスが小さいことなどが要求される。また、軟磁性材料は、トランス、リアクトルやチョークコイルの磁心材料として交流磁場励磁状態で使用される場合が多く、鉄損(P)を低く抑えるためにヒステリシス損失(P_h)と渦電流損失(P_e)の低い材料が要求される。このため、軟磁性材料には、一般に電気抵抗率(ρ)が高いことや、圧延などにより薄板化できることなども要求される。図1に2000年までの主な軟磁性材料の開発の歴史を示す。1900年のけい素鋼開発以降、パーマロイなどの高透磁率軟磁性材料が開発され、超急冷法などの新しいプロセス開発に

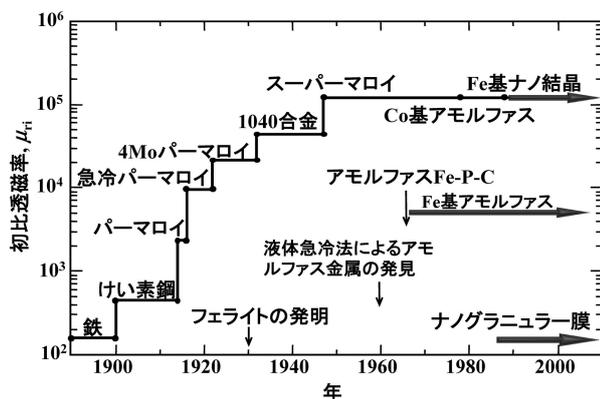


図1 軟磁性材料開発の歴史.

より、1960年代に結晶構造を持たない強磁性アモルファス合金⁽¹⁾、1980年代にはナノ結晶軟磁性合金⁽²⁾やナノグラニューラ軟磁性薄膜⁽³⁾などのナノ構造を制御した新しいタイプの軟磁性材料が開発され、ナノ構造制御による軟磁性材料の研究開発が盛んに行われるようになった。このように、20世紀は次々に新しい軟磁性材料の発明や改良が行われ、軟磁性材料の磁気特性は飛躍的に向上した。21世紀に入ると、地球環境保全・省エネルギーや小型・軽量化などがより重視され、高 B_s 化・低損失化を目的とした軟磁性材料の研究開発が活発になっている。

本稿では、主な金属系軟磁性材料の開発動向と今後の展望について概観する。

2. 軟磁性材料の動向

近年、地球温暖化などの環境問題が議論されるようになり、エネルギー消費機器等の効率を可能な限り高めることが求められるようになってきている。このような背景から、日本では機器の省エネ基準を策定する際にトップランナー方式を採用したトップランナー制度が制定されている⁽⁴⁾。トップランナー方式とは対象となる機器ごとに基準値を設定し、達成年度を定めて機器そのもののエネルギー消費効率を高めていくように普及促進する政策で、配電用トランス、エアコンディショナー、スイッチング機器や三相誘導電動機など30を越える機器に導入されている。これらの機器に使用される軟磁性材料に対しても、当然のことながら低損失であることが要求されている。また、最近の自動車などの電動化の進展により、従来軟磁性材料があまり使用されてこなかった分野においても、軟磁性材料が使用される機会が増加し、これらの応用分野に適合した軟磁性材料の開発が求められている。また、軟磁性材料には、損失の低減に加えて、機器の小型化

* 国立研究開発法人物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 NIMS 特別研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1) Development Trend and Outlook for Soft Magnetic Materials; Yoshihito Yoshizawa(Research Center for Magnetic and Spintronic Materials, National Institute for Materials Science, Tsukuba)

Keywords: soft magnetic material, amorphous soft magnetic material, nanocrystalline soft magnetic material, nanogranular soft magnetic film, electrical steel sheet, powder core, high magnetic induction, low loss, high permeability, low coercivity

2016年5月30日受理[doi:10.2320/materia.56.186]

(省スペース化)・軽量化も重視されるため、軟磁性材料には、低損失・低 H_c であることと、高 B_s で動作磁束密度(B_m)を高く設計できることなどが要求されている。しかし、図2に示すように、一般に B_s が高い軟磁性材料ほど H_c が大きくなる傾向があり、軟磁性材料において高 B_s と低 H_c を両立させることは難しい課題である。

また、近年インバータやスイッチング電源などの機器の高周波化や高容量化(高エネルギー密度化)が進み、トランスやチョークコイルなどに使用されている軟磁性材料に対して、高周波領域の損失低減に加え、部品の小型化のために材料の B_s をより高くすることが求められている。

以上のように、軟磁性材料に対しては種々の特性向上が求められているが、すべてを満足できる軟磁性材料は存在せず、使用目的に応じて、軟磁性材料が使い分けられているのが現状である。以下に主な金属系軟磁性材料の開発動向について概説する。

(1) 電磁鋼板(けい素鋼板)

軟磁性材料は、モータや配電用トランスの鉄心への使用量が非常に多く、電磁鋼板(けい素鋼板)が主に使用されている。モータには主に無方向性電磁鋼板が、配電用トランスの鉄心には、方向性電磁鋼板が使用されており、材料の高性能化に関する研究開発は主に企業において行われている。近年は、ハイブリッド電気自動車(HEV)や電気自動車(EV)などが販売されるようになり、自動車に使われるモータの高出力化などが重要となっている。モータ高出力のために回転数を増加させた場合には、高周波励磁下で低鉄損であることが要求される。低鉄損化のため、高Si材の板厚薄手化により渦電流損失を低減し、鉄損を低減させた電磁鋼板が開発されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

配電用トランスに使用される方向性電磁鋼板では、結晶粒の配向度を高め新しい磁区細分化技術により鉄損を更に低減

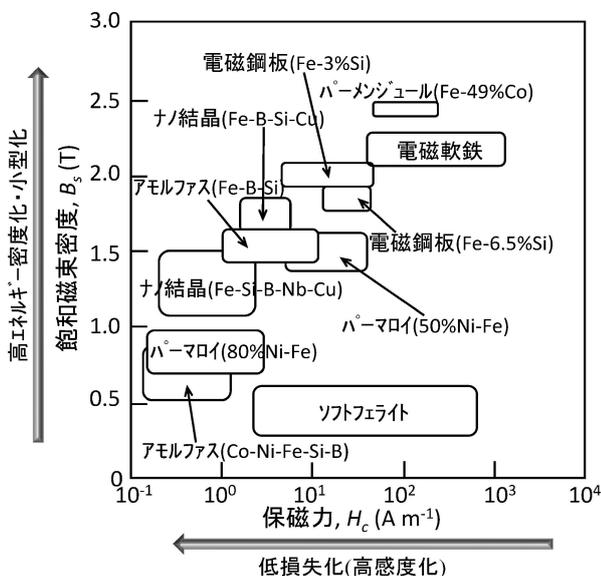


図2 軟磁性材料の飽和磁束密度と保磁力の関係(概略図)。

させた材料などが開発されている⁽⁷⁾。

(2) アモルファス軟磁性材料

エネルギー消費機器等の効率を可能な限り高めることが求められるようになり、日本ではトップランナー方式が配電用トランスに採用されたこと、海外においても高効率トランス等に厳しい規格が作られてきていることなどから、鉄損が低いアモルファス軟磁性合金薄帯材料に注目が集まり、Fe-Si-B系アモルファス軟磁性材料の配電用トランスへの適用が進んでいる。Fe-Si-B系アモルファス軟磁性材料の素材の熱処理後の鉄損は、50 Hz, 1.3 Tで約 0.1 W kg^{-1} であり磁区細分化高級方向性電磁鋼板の約1/4と低損失である。しかし、Fe基アモルファス合金の B_s は方向性電磁鋼板の B_s に比べて低いため、鉄心サイズが大きくなるという欠点がある。最近、現在最も製造されているFe-Si-B系アモルファス材料の $B_s=1.56 \text{ T}$ を $1.63\sim 1.64 \text{ T}$ に向上させたアモルファス合金材料が開発された。50 Hz, 1.4 Tにおける鉄損値約 0.1 W kg^{-1} が得られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。更に、アモルファス材料の B_s を高めることにより、アモルファストランスの鉄心サイズや騒音などの問題も改善されている。

また、最近ではFe基アモルファス材料の低鉄損・高透磁率特性に着目し、アモルファス材料をモータ鉄心に応用する検討が行われている。Fe-Si-B系アモルファス材料のPは50 Hz, 1 Tで約 0.05 W kg^{-1} , 400 Hz, 1 Tで約 1.5 W kg^{-1} であり、50 Hzでは無方向性電磁鋼板の鉄損の約1/10, 400 Hzでは1/5以下である。Fe基アモルファス軟磁性材料の低鉄損特性を活かしモータ鉄心にFe基アモルファス材料を使用することにより高効率のモータが実現できることが明らかにされている⁽¹⁰⁾。

単ロール法などで製造されるFe-Si-B系アモルファス材料よりもアモルファス形成能が高いFe基軟磁性材料として1995年にFe-Al-Ga-P-C-B系のFe基金属ガラスが開発され⁽¹¹⁾、その後多くのFe基の金属ガラス系の合金が開発されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし、Fe基金属ガラスは脆化しやすく B_s もFe-Si-B系アモルファス合金薄帯材料より低いため、薄帯やバルク軟磁性材料としては現在実用化されていない。しかし、粉末材料の製造においては、アモルファス形成能が高いというメリットを活かすことができ、アモルファス単相の低 H_c の粉末が得られやすいため、高周波用圧粉磁心⁽¹⁴⁾などに実用化されている。

(3) ナノ結晶軟磁性材料

優れた軟磁性を実現するためには、結晶磁気異方性定数(K)を低減することが重要であるが、多結晶材料の K は材料の組成ではほぼ決定されるため、結晶サイズが大きい通常のFe基多結晶材料では大幅な軟磁性向上(H_c の減少)を実現することは困難である。しかし、図3に示すように結晶粒をナノスケールサイズまで微細化することにより、実効的な磁気異方性を減少させ、 H_c を減少させることができる。Fe-Si-B-Nb-Cu系ナノ結晶軟磁性材料の B_s は $1.2\sim 1.35 \text{ T}$

で⁽²⁾⁽¹⁵⁾, 配電トランスなどに使用されている Fe-Si-B 系アモルファス合金の $B_s = 1.56 \sim 1.63$ T に比べその値は低いが, Co 基アモルファス合金や PC パーマロイよりは高 B_s であり, これらの高透磁率材料に匹敵する非常に優れた軟磁性を示すため, 漏電ブレーカ, 電流センサ, ノイズ対策部品, 高周波トランスや加速器などの用途に実用化されている. その後, 更に B_s が高いナノ結晶軟磁性材料の研究開発が行われ, 1990年には B_s が $1.5 \sim 1.7$ T の Fe-(Nb, Zr)-B 系材料が⁽¹⁶⁾, 1998年には残留アモルファス相の T_c が高く高温特性が良好な (Fe, Co)-Zr-B-Cu 系ナノ結晶材料⁽¹⁷⁾などが発表されている. 2000年代後半には, Nb など磁化を低下させる元素や高価な Co を含まない更に高 B_s の Fe 基ナノ結晶軟磁性材料が開発され, 2007年には B_s が 1.85 T の Fe-B-Si-Cu 系材料が⁽¹⁸⁾, 2009年には B_s が $1.7 \sim 1.85$ T の P を添加した Fe-B-Si-P-Cu 系のナノ結晶軟磁性材料が開発された⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. これらの材料は, 初期微結晶タイプと急加熱タイプの2つのタイプの材料⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾に分類できる. 初期微結晶タイプのナノ結晶材料は, 合金薄帯作製時にアモルファス相中に微細な結晶粒を分散させ, その後通常の熱処理を行い均一微細なナノ結晶組織が実現されている. 急加熱タイプのナノ結晶材料は, アモルファス合金薄帯を作製後, 急加熱熱処理を行うことにより均一微細なナノ結晶組織が実現されている. 初期微結晶タイプの材料は, 合金薄帯作製の際の適正冷却条件の範囲が狭いという問題がある. 一方, 急加熱タイプは, 多量に熱処理を行う場合に, 急加熱できなくなること, 急激な結晶化による発熱により, 材料内部が過度に温度上昇し, 材料全体で均一微細なナノ結晶組織を実現するのが難しいなどの課題があり, 実用化へのハードルは高いが, 実用化に向けた研究開発が続けられている⁽²²⁾.

また, 電子部品用のナノ結晶軟磁性材料では, チョークコイルやセンサなどの用途に適する低損失(低 H_c)で磁気飽和しにくいフラットな磁化曲線を示す比較的低透磁率を示す材料が必要とされている. Co や Ni を Fe に置換した (Fe, Co, Ni)-Si-B-Nb-Cu 系合金に対して磁界中熱処理を行い, 磁気異方性を制御することにより, 初比透磁率が300から5000程度の材料が開発されている⁽²³⁾. また, 張力を印加させながら Fe-Si-B-Nb-Cu 系アモルファス合金薄帯に対して

結晶化熱処理を行うことにより, 薄帯長手方向が磁化困難軸方向となるよう磁気異方性を誘導させることが可能であり, 広範囲に透磁率を制御した材料が開発されている⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾. これらの低透磁率タイプのナノ結晶軟磁性材料は, ヒステリシスが小さく, フラットな $B-H$ カーブ形状で磁界 (H) に対する透磁率変化が小さい特徴がある. より高い周波数・重畳磁場まで透磁率低下を抑えることができるため, 高周波領域の直流が重畳される用途への応用が進むものと考えられる.

(4) 圧粉磁心

スイッチング電源などの各種電子機器の高周波化と高エネルギー密度化が進み, 高周波において損失が低くかつ B_s の高い軟磁性材料が要求されている. 図4に各種軟磁性材料の B_s と使用周波数領域の関係の概略図を示す. 高周波領域では電気抵抗の高いフェライトが主に使われてきたが, B_s が低いため高エネルギー密度化に対応することが困難になり, フェライトよりも高 B_s の金属軟磁性材料を使用せざるを得ない用途も増えている. しかし, 鉄, 電磁鋼板やパーマロイなどの金属材料は電気抵抗率がフェライトなどに比べて低くそのまま高周波領域で使用した場合には渦電流損失が大きくなってしまいうため, 金属系軟磁性粉末表面を絶縁層で被覆した粉末を成型した圧粉磁心の開発が行われている.

圧粉磁心に使用される軟磁性粉末には, パーマロイ, センダスト, けい素鋼などの結晶質材料粉末が使用されてきたが, 近年リアクトル・モータや高周波パワーチョークなどの用途において圧粉磁心の適用が検討されるようになり, より高磁束密度の圧粉磁心が要求されるようになった. このため, けい素鋼や鉄粉末を用いた高い磁束密度を示す圧粉磁心の開発が再び活発化している. また, アモルファス形成能が高い金属ガラス系のアモルファス合金粉末や従来のアトマイズ法よりも冷却能力が高い SWAP 法 (Spinning Water Atomization Process) により作製された Fe 基アモルファス合金粉末が開発され, これらの軟磁性合金粉末を用いた高周波用途向け低損失圧粉磁心が開発されている⁽²⁶⁾⁻⁽²⁸⁾.

圧粉磁心は軟磁性金属粒子間に存在する非磁性絶縁層被覆により初比透磁率は数10~200程度の傾斜した $B-H$ 曲線を示し磁気飽和しにくいのが特徴である. しかし, 一般に H_c

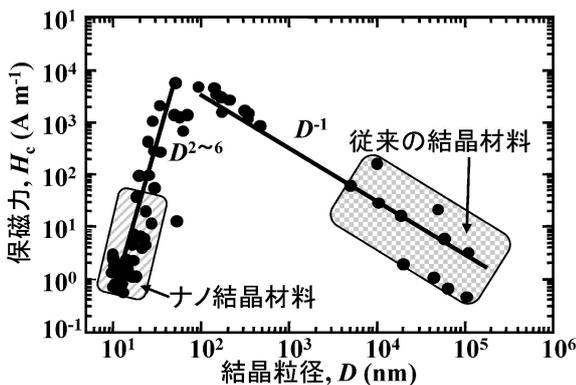


図3 保磁力 H_c の結晶粒径 D 依存性.

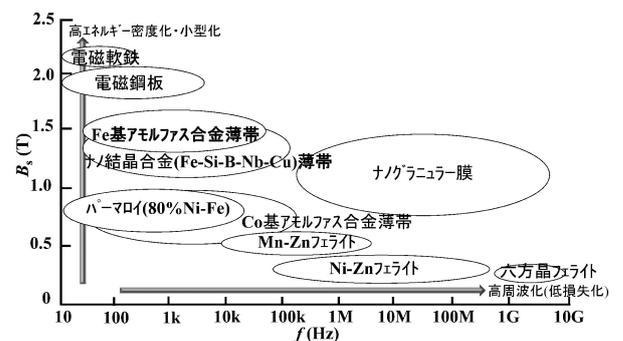


図4 各種軟磁性材料の B_s と使用周波数領域, f の関係(概略図).

がバルクの軟磁性材料よりも大きく P_h が増加する傾向があり、圧粉磁心の応用範囲を広げるためには、圧粉磁心に適する高 B_s 低 H_c 軟磁性粉末材料の開発が重要である。

(5) ナノグラニューラー軟磁性膜

バルク材料の分類には入らないが、ナノ構造を制御した比較的新しい軟磁性材料としてナノグラニューラー軟磁性膜について概説する。(Fe, Co)-M-(O, N, F) 組成の Fe, Co のナノ結晶粒が高電気抵抗率の M-(O, N, F) で囲まれたナノグラニューラー構造の軟磁性薄膜が開発されている⁽²⁹⁾。M は Ti, Ta, Mg, Al, Zr, Nb, Hf, および希土類元素であり、Fe や Co よりも O, N, F との親和性が強い。このため、ナノグラニューラー構造の膜が形成すると考えられている。このナノグラニューラー膜は、フェライトに比べて高 B_s で、通常の金属系材料よりも高電気抵抗であるため、高周波領域において比較的高い透磁率が得られ、高周波用の薄膜部品への適用が検討されている。

3. 今後の展望

高 B_s と低 H_c ・高 μ ・低損失の両立は軟磁性材料の永遠の課題であるが、すべての用途に対して要求される特性を満足できる軟磁性材料は、現状存在しない。実用化されている軟磁性材料で、最も B_s の高い材料は Fe-Co 合金でありその値は 2.45 T である。薄膜材料などではこれを越える B_s の材料への挑戦はあったが、この B_s を越えるバルク材料の開発は、ハードルが高く実現していない。高 B_s 材料開発については、長期的な新物質の探索が重要と考えられる。

また、高 B_s と低 H_c ・低鉄損を両立した Fe 系軟磁性材料の開発も重要なテーマであり、ナノ結晶軟磁性材料がこの候補として期待される。新プロセス開発により新しい微細構造からなる新軟磁性材料の開発にも期待したい。高周波用軟磁性材料では、高周波領域まで使用可能な高抵抗・高 B_s で高透磁率を示すナノグラニューラー構造の軟磁性バルク材料や軟磁性粉末・微粒子と他の材料とを複合化した新しい微細構造の軟磁性材料の実現を期待したい。

また、高エネルギー密度や小型化が進んだ場合、使用されている部品の温度が現状の設計よりも高くなってくると、高温特性に優れた軟磁性材料の開発も重要な研究開発テーマになるものと考えられる。

4. おわりに

近年の省エネ意識の高まりや自動車をはじめとする各種装置・機器の電動化の進展により、軟磁性材料の重要性は今後益々増すものと考えられる。軟磁性材料において重要な透磁率や保磁力などの特性は、材料の微細構造に非常に敏感なため、軟磁性材料の開発において微細構造の制御は非常に重要である。微細構造の解明による微細構造制御や新規な微細構造を実現することにより、革新的な軟磁性材料が日本の研究

者から生まれ、軟磁性材料の応用分野や市場が更に拡大することを期待したい。

文 献

- (1) P. Dewez and S. C. H. Lin: J. Appl. Phys., **38**(1967), 4096-4097.
- (2) Y. Yoshizawa, S. Oguma and K. Yamauchi: J. Appl. Phys., **64** (1988), 6044-6046.
- (3) H. Karamon, T. Masumoto and Y. Makino: J. Appl. Phys., **57** (1985), 3527-3532.
- (4) 経済産業省資源エネルギー庁：トップランナー制度，2015年3月版。
- (5) 薮本政男，開道 力，脇坂岳頭，久保田猛，鈴木規之：新日鉄技報，**378**(2003)，51-54。
- (6) 尾田善彦，大久保智幸，高田正昭：JFE 技報，**36**(2015)，6-11。
- (7) 高宮俊人，花澤和浩，鈴木毅浩：JFE 技報，**36**(2015)，1-5。
- (8) Y. Ogawa, M. Naoe, Y. Yoshizawa and R. Hasegawa: J. Magn. Magn. Mater., **304**(2006), e675-e677.
- (9) K. Takahashi, D. Azuma and R. Hasegawa: IEEE Trans. Magn., **49**(2013), 4001-4004.
- (10) Y. Enomoto, M. Ito, H. Koharagi, R. Masaki, S. Ohiwa, C. Ishihara and M. Mita: IEEE Trans. Magn., **41**(2005), 4304-4308.
- (11) A. Inoue and J. S. Gook: Mater. Trans., JIM, **36**(1995), 1180-1183.
- (12) A. Inoue and B. L. Shen: Mater. Trans., **43**(2002), 766-769.
- (13) A. Makino, T. Kubota, C. T. Chang, M. Makabe and A. Inoue: Mater. Trans., **48**(2007), 3024-3027.
- (14) 水嶋隆夫，小柴寿人，内藤 豊，井上明久：粉体および粉末冶金，**54**(2007)，768-772。
- (15) Y. Yoshizawa, K. Yamauchi, T. Yamane and H. Sugihara: J. Appl. Phys., **64**(1988), 6047-6049.
- (16) K. Suzuki, N. Kataoka, A. Inoue, A. Makino and T. Masumoto: Mater. Trans., JIM, **31**(1990), 743-746.
- (17) M. A. Willard, D. E. Laughlin, M. E. McHenry, D. Thoma, K. Sickafus, J. O. Cross and V. G. Harris: J. Appl. Phys., **84** (1998), 6773-6777.
- (18) M. Ohta and Y. Yoshizawa: Jpn. J. Appl. Phys., **46**(2007), L477-L479.
- (19) M. Ohta and Y. Yoshizawa: Appl. Phys. Exp., **2**(2009), 023005.
- (20) A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta and A. Inoue: J. Appl. Phys., **105**(2009), 07A308.
- (21) M. Ohta and Y. Yoshizawa: J. Phys. D: Appl. Phys., **44**(2011), 064004.
- (22) 牧野彰宏：まてりあ，**55**(2016)，89-96。
- (23) Y. Yoshizawa, S. Fujii, D. H. Ping, M. Ohnuma and K. Hono: Scr. Mater., **48**(2003), 863-868.
- (24) L. Kraus, K. Závěta, O. Heczko, P. Duhaj, G. Vlasák and J. Schneider: J. Magn. Magn. Mater., **112**(1992), 275-277.
- (25) H. Fukunaga, H. Tanaka, T. Yanai, M. Nakano, K. Takahashi and Y. Yoshizawa: J. Magn. Magn. Mater., **242-245**(2002), 279-281.
- (26) 大塚 勇，遠藤 功，越本秀生，山本裕史，奥野良誠，吉野正規，深見寿孝，八木正昭：日本応用磁気学会誌，**21**(1997)，617-620。
- (27) 大塚 勇，前田 優，石山和志，八木正昭：粉体および粉末冶金，**56**(2009)，563-567。
- (28) 松元裕之，浦田顕理，山田健伸，吉田栄吉：NEC 技報，**60**(2007)，61-64。
- (29) 大沼繁弘，三谷誠司，藤森啓安，増本 健：日本応用磁気学会誌，**20**(1996)，489-492。



吉沢克仁

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
 1981年 東北大学大学院工学研究科博士課程前期修了
 1981年 日立金属株式会社入社
 2016年4月- 現職
 専門分野：磁性材料(主にアモルファス・ナノ結晶軟磁性材料)
 ◎超急冷プロセスによる軟磁性材料の研究開発に従事。
 ★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★