

「物性なんでも Q&A」第 21 回

磁気物性

科学技術振興機構(JST) 佐藤勝昭

このコーナーでは、小生のホームページの「物性なんでも Q&A」コーナーに寄せられた質問と回答の中から、結晶工学関係者にご関心のありそうなものをピックアップしてご紹介しています。今回は、最近企業からの質問が増加している「磁気物性」に関する質問をご紹介します。なお、磁気光学に関する質問は別の機会に譲ります。

分類	番号	質問内容	所属
磁気工学	895	金属加工時の磁化	企業
磁気物性	989.	ニッケル,コバルト,鉄はなぜ磁石の材料になるの	小学生
スピントロニクス	1036	MgO をトンネル障壁に使うと TMR が増大する理由	院生
磁気物性	1137	金属間化合物 Fe ₂ Al ₅ の磁気特性	公設試
磁気物性	1148	磁壁のピニング効果	院生
磁気物性	1279	鉄単結晶の磁気異方性	企業
磁気物性	1297	強磁性体に関する質問	弁理士

895. 金属加工時の磁化

Q1:はじめまして。平面研削盤を製造販売しております O 社設計課の T と申します。フライス盤で金属を加工していると、切粉が磁力を持つ時があります。どのような原理でそうなるのか、又金属の種類によっても磁力が変わるのか？普通砥石で金属を研削する場合にも同様な磁力化が発生するのか？よろしく願いいたします。

A1:T 様、佐藤勝昭です。

加工する金属は何でしょうか。磁性金属を含まない純粹の非磁性金属を加工して、切粉が磁力を持つとしたら、加工機械の鉄製のバイトが摩耗して混入したとしか考えられません。その場合ふつう砥石で研磨したら磁化は観測されないと思われます。

Q2:早々ご回答有難うございました。加工現場に行き状況を聞いてきました。

被削材料は SCM440 です。厚さ 40 mm の材料を φ15 mm のエンドミルで深溝加工しております。φ800 mm 程度の大きさの材料で、場所により磁性の状態が違うように思われます。過去に S45C の材料でも同じような現象が見られたようです。

A2: T 様、佐藤勝昭です。

SCM440 はクロムモリブデン鋼（通称クロモリ）の一種です。Fe を主成分とし、C を

0.5%程度含む中炭素鋼で、Cr, Mo を含んで焼き入れ性を高めています。もとの合金はオーステナイトなので結晶構造は fcc で室温で非磁性ですが、焼き入れでマルテンサイトになると結晶構造が bcc の部分が生じ、磁性を示すのでしょうか。焼き入れ後の組織状態によって、磁性も違ってくるかと存じます。

この場合は、加工の際にどのくらい高温になるかによって、マルテンサイト量が変わりますから、部分的に磁性の強い部分と弱い部分があるのでしょうか。ふつう砥石を使っても、高温になれば同じことが起きます。

AA: ご回答大変有難うございました。詳しく教えていただき助かりました。今後ともご指導をよろしく願いいたします。

989. ニッケル,コバルト,鉄はなぜ磁石の材料になるの

Q: 佐藤先生、はじめまして。

小学校6年のSと申します。物性なんでも Q&A のホームページを見てメールしました。よろしく願いします。

自由研究で分からないところがあったので、教えて下さい。

ぼくはこれまでに、小学校3年のときから5年まで自由研究で、「磁石の力」と題して磁石について研究を行ってきました。

3年...磁石にくっつくものとくっつかないものを調べたり、砂鉄を使って磁界の形を確認した。

4年...コイルに磁石を通して電流を起こした。コイルと磁石を使って発光ダイオードを光らせた。

5年...電流が作る磁界について調べた。磁石と電流が作る磁界を利用してモーターを回してみた。今まで自由研究を行って来てわからないことがありましたので 下に書いてみます。

1. どうして磁石を作るのにニッケルやコバルト、鉄がほとんどの磁石の材料の中に入っているのですか？また、なぜこれらの物質だけが磁石に引き付けられるのか。ぼくは、磁石を作るために必要なニッケル、コバルト、鉄の中に必要な何かがふくまれているのだと思います。

2. なぜ鉄は磁石に引き付けられるのか。

これまでに、元素、原子、周期表について調べました。また、原子核の周りに電子が取り巻いているものを原子ということも調べました。周期表は、原子核を取り巻いている電子の数の小さい順に並んでいることも知りました。鉄、コバルト、ニッケルはそれぞれ原子番号が、26、27、28 だということも知りました。けれども、となりの原子番号29の銅は、磁石にはくっつかないことが不思議に思いました。これは元素特有の性質から来るものだと僕は思います。でもそれが何なのかがわかりません。

子供向けの磁石の本を図書館で借りてみたけれども、この二つの質問のことは書いてありませんでした。

小学校最後の年なので絶対に自由研究を成功させたいです。この質問をとくことが自由研究の課題のひとつなので、質問に答えてくださるとうれしいです。

A1: S君、佐藤勝昭です。君は小学校6年生なのに、素晴らしい質問をしますね。

2つの質問とも、小学校で学ぶ理科の範囲の知識では理解できない内容です。大学の

物理系の学科でも教えない場合 があります。従って、以下の説明ではわからないかもしれませんが、我慢して付いてきてください。

1. ニッケル,コバルト,鉄はなぜ磁石の材料になるか

元素の周期表において、鉄(Fe)、コバルト(Co)、ニッケル(Ni)は、上から4段目にありますね。周期表は、原子の電子配置にもとづいて並べられています。量子力学によれば、原子の中の電子状態は、主量子数 n 、方位量子数 l およびスピン量子数 s を使って分類されます。主量子数は電子の波の動径方向の広がりをあらわし、方位量子数は電子の波の空間的な分布をあらわしています。

主量子数 n に対し、方位量子数 l は $n-1$ 、 \dots 、 0 の値をとります。方位量子数 l が 0 の電子を s 電子、 1 の場合を p 電子、 2 の場合を d 電子といいます。 n と l で指定された電子のスピン量子数 s は $1/2$ と $-1/2$ の2つしか取りません。

・周期表の1段目は主量子数が1です。方位量子数は $n-1=0$ しか取れません。つまり s 電子のみです。水素Hは、主量子数1で方位量子数が0であるような電子、 $1s$ 電子が1個だけ原子核(陽子)の回りを回っています。Heは、スピン $s=1/2$ と $s=-1/2$ の2個の $1s$ 電子で原子核の回りを回っています。Heのように満ちている状態を閉殻といいます。

・周期表の2段目は主量子数が2です。この場合方位量子数は1と0の2種類をとります。方位量子数0を持つのは $2s$ 電子で、スピンまで考えると2つの状態があります。これらはLiとBeです。方位量子数1を持つのは $2p$ 電子ですが、これには、 $1,0,-1$ の3種類の磁気量子数で指定される3つの電子状態をとり、スピンまで考慮すると $3 \times 2 = 6$ 個の電子状態をとります。B, C, N, O, F, Neは $2s$ 電子2個の外に $2p$ 電子が1,2,3,4,5,6個あります。Neは閉殻を作ります。

・周期表の3段目には $3s$ 状態、 $3s3p$ が対応します。電子配置は Na $3s$, Mg $3s(2)$, Al $3s(2)3p(1)$ 、Si $3s(2),3p(2)$ \dots Ar $3s(2)3p(6)$ です。Arも閉殻を作ります。

・周期表の4段目が問題です。本来なら主量子数3には方位量子数が2である $3d$ 電子が先に満ちるはずはずですが、それをほって置いて主量子数4である電子配置が先に来ます。K, Caはそれぞれ $4s(1),4s(2)$ です。隣のScに移ると $4s(2)+3d(1)$ とここで初めて $3d$ 電子が出てきます。 $3d$ 電子には磁気量子数が $2,1,0,-1,-2$ の5つの状態 \times スピンの2種類 = 10通りの状態が対応します。Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cuに対応して Sc: $3d(1)4s(2)$, Ti: $3d(2)4s(2)$, V: $3d(3)4s(2)$, Cr: $3d(5)4s(1)$, Mn: $3d(5)4s(2)$, Fe: $3d(6)4s(2)$, Co: $3d(7)4s(2)$, Ni: $3d(8)4s(2)$ Cu: $3d(1)4s$ という電子配置をとります。

磁性を示すのは $3d$ 電子がある系です。実はスピンが磁気のもとになっていますが、スピン量子数の $+1/2$ と $-1/2$ がペアになっていると磁気をもちません。ペアにならないスピンがあつて初めて磁性を持ちます。Cuは10個の $3d$ 電子があり閉殻になっています。 $+1/2$ スピンが5個、 $-1/2$ スピンが5個なので、全体としてスピンの打ち消され、磁気を持ちません。

CrやMnはペアを作らないけれど、反強磁性という状態になり、それ自体では磁石になりませんが、CrTeやMnGaのように合金や化合物になると磁石になるので、磁性体の予備軍です。

Fe, Co, Niがなぜ室温で磁気を持つかについては、原子としての性質だけでは説明できずスピンを考慮した固体の電子構造を考えなくてはなりません。このあたりのことは、大学院生にならないと理解できないでしょう。

ある物質が磁石になりうるかは、量子力学にもとづいて原子のもつ電子の配置とスピ

ンを考慮して初めて説明できるのです。小学生の学力で無理してわかろうとせず、数学や物理の基礎的な学力を一步步積み上げることが重要です。

2. なぜ、鉄は磁石にくっつくか？

・鉄は強磁性体（磁石になる性質をもつ物質）です。作ったままの鉄は磁気を帯びていません。この状態では、鉄の中を見るといくつもの様々な向きをむいた小磁石から出来ていて全体として磁石の性質を失っています。強い磁石を近づけると中の小磁石が向き変えるためにその磁石と反対の極性をもつ磁気を帯び引き合ってくっつくのです。鉄は磁石によって磁気が誘起されるのです。正確には、小磁石を磁区といいます。

Q2: S です。質問の返事を書きいただきありがとうございます。

一度読んでみましたが、よく分かりませんでした。何度も読んでみたいと思います。また、お父さんや先生に聞いてみたいと思います。しかしひとつだけ分かったことがあります。それは、磁気の原因になるものが電子だということです。もうひとつ質問させてください。磁石は磁界を作りますが、磁界があるとなぜ磁石や鉄を引き付けるのですか。よろしくお願いします。

A2: S 君、佐藤勝昭です。

「磁気の原因になるものが電子だということ」を分かっただけでも立派ですよ。もっと詳しくいえば、電子のスピンが磁気のもとになっているのですよ。私のホームページで授業のパワーポイントを見てください。大学では電磁気学や量子力学を学んでいることを前提として講義をしますから小学生には理解できないと思います。

「磁石は磁界を作りますが、磁界があるとなぜ磁石や鉄を引き付けるのですか」という質問ですが、磁界の定義はもともと力から定義されています。距離が r だけ離れた $+q[\text{Wb}]$ と $-q[\text{Wb}]$ の 2 つの磁極間には $F=q \times q / 4\pi\mu_0 r$ の引力が働きます。これを $+q$ の磁極から出る磁界 H の中に $-q$ の磁極を置いたときに qH の引力が働くと定義します。すると磁界は $H = q / 4\pi\mu_0 r$ となります。

Q2: S です。お返事ありがとうございます。

授業資料は、難しい計算が多くて、先生が言うように理解できませんでした。近いうちに分かるようにしたいです。これで質問は終わりですが、先生にお願いがあります。今までのことを自由研究の一部として利用させていただきませんか。

A2: 世古君、佐藤勝昭です。「近いうちに分かるようにしたい」とのことですが、あせらずじっくり基礎的な学力をつけてください。高校生くらいで理解できるようになればよいですね。あと、私が説明した内容を使ってくれていいですよ。

1036. MgO をトンネル障壁に使うと TMR が増大する理由

Q: 佐藤勝昭様

はじめまして、「物性なんでも Q&A」を度々参考にさせていただいています。現在 H 大学博士前期課程 1 年の H と申します。

現在 spin-FET に関する研究をしています。具体的には強磁性電極から半導体(二次元電子系)への高効率スピン注入です。そこで、スピン注入という観点から TMR について調べていたところ、トンネルバリアとして、それまで用いられていた Al_2O_3 では

なく MgO を用いることによって TMR 比が改善されたようです。

私自身様々な資料を調べましたが、なぜ Al₂O₃ ではなく MgO で TMR 比が改善 (スピン注入効率の改善とほぼ同義?) されたのかわかりません。

ちなみに量子力学(小出昭一郎著)と固体物理の基礎(キッテルの固体物理入門程度)は理解しているつもりです。急な質問で恐縮ですが、何卒ご教授くださいませ。

A: H君、佐藤勝昭です。研究上の疑問は指導教員に聞くのが筋ですよ。しかし、先端的なことは教員も十分に勉強していないことがありますので、説明しておきましょう。磁気トンネル接合素子において、アモルファスの Al₂O₃ に代えて結晶性の MgO をトンネル障壁に使うと TMR が改善され 1000%におよぶ値が得られる可能性があることは、Butler らが 2001 年に理論的に予言しました。(W. H. Butler, X.-G. Zhang, T. C. Schulthess, J. M. MacLaren: Phys Rev. B63 (2001) 054416.)

世界中の研究者が実験的に検証しようとしたましたが、成功しませんでした。しかし、産総研の湯浅ら、および IBM の Parkin らが独立に、良質の MgO 単結晶層の作製に成功し、200%におよぶ大きな TMR 比を実現しました。(S. Yuasa, A. Fukushima, T. Nagahama, K. Ando, Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) L588. S. S. P. Parkin et al., Nature Mater. 3 (2004) 862.) 現在では 500%という大きな値が報告されています。

従来のアモルファス絶縁層によるトンネル効果では、電子のトランスファーが散漫トンネルによって起きるのでエネルギーの保存だけがかかわったのですが、結晶絶縁層を用いるとコヒーレント・トンネルとなり、エネルギーだけでなく運動量が保存されるために、MR は電極のバンド構造を反映し、磁化が平行のときはトンネルできるが反平行のときはトンネルできなくなるのです。(猪俣浩一郎: RIST ニュース No. 42(2006) 35.参照) トンネル障壁層を単結晶にすると、特定の波数ベクトルを持つ電子波動関数の連続性が保たれ、伝導率が特定のバンド電子の透過率で決まるために等価的に高いスピン分極率が得られるということです。

AA: 佐藤勝昭様、迅速な返信、さらには、大変参考になる資料紹介に感謝致します。

1137. 金属間化合物 Fe₂Al₅ の磁気特性

Q: 佐藤勝昭先生、初めまして。H試験場のTと申します。

金属材料の研究開発をしております。ネットで検索していて先生のサイトに至りました。

金属間化合物 Fe₂Al₅ の磁気特性を調べております。高温での磁気特性、特にキュリ一点を調べています。実験的には、常温では Fe₂Al₅ は強磁性を有することを確認しておりますが、高温では実験が難しくお手上げの状態です。磁気に関しては私は全くの素人なので、文献など調べておりますがなかなか行き着きません。もしご存じであれば教えて頂きたいお願い申し上げます。

A: T様、佐藤勝昭です。

私は金属磁性体の専門家ではありません。以下のお答えは一般論です。(なお、一部はその道の専門家である隅山先生の助けをいただいています。) Al-rich の FeAl 金属間化合物は耐食性をもち機械的強度が高く構造材料として最近元素戦略上注目されている材料ですが、あまりきちんとした物性データがないのではないかと思います。

図1の結晶相図は Metals Handbook, Vol. 63, 10th Edition, ASM International, (1992)に載っているものです。

D. Kaptas の論文によれば、「FeAl₂の磁性はCrと同様のインコメンシュレート型の反強磁性であるが、キャント反強磁性がみられる」と書かれています。(D. Kaptas, Phys. Rev. B 73 (2006) 012401 [4 pages])

FeAl 金属間化合物の粉末試料の磁性は名工研の橋井さんが研究しておられます。H10年度の報告によると、名工研では、ボールミルで金属間化合物を作っており、メスバウア分光で磁性を評価しています。組成は書いてないのですが、ミリングの中間段階では強磁性だが、最終段階では常磁性となっています。

Fe-Al 合金系の磁性の情報は「磁性体ハンドブック」p364にありました。Fe₃Al など Fe-rich の組成はセンダストなどとして研究された磁性体です。Al の組成を増加すると、25%を超えたあたりから磁化は急速に低下します。磁性体ハンドブックには Al-rich 組成のものは記述がありません。

金属磁性の専門家で以前 Fe-Al 系アモルファス合金を研究しておられた名工大の隅山教授が Fe-Al 系の文献をどさっとお送りいただきました。全部に目を通す時間がなかったのですが、その中で特に目に付いたのは、隅山先生の論文

K. Sumiyama, Y. Horose, and Y. Nakamura: Structural and Magnetic Properties of Nonequilibrium Disordered Fe-Al Alloys Produced by Facing Target Type DC Sputtering; J. Phys. Soc. Jpn. 59 [8] (1990) pp. 2963-2970. です。

この論文に図2の磁気相図が出ています。(a),(b)はスパッタ法で作製したもので(a)は水冷基板、(b)は液体窒素冷却基板の場合です、(c)は水冷急冷で作製したバルク合金です。(R.D. Shull et al.: Solid State Commun. 20 (1976) 863; K.H. Fischer: Phys Stat. Sol. (b) 116 (1983) 357, ibid.(b) 130 (1985) 13.)

いずれにせよ、急冷 Fe₂Al₅ (Al 72%)では常磁性のようです。上記隅山論文とその引用文献を調べてください。

Al-rich の Fe-Al は常磁性のはずなのに、「強磁性」がなぜ出るかということですが、R.A. Dunlap et al., Physical properties of rapidly quenched Al-Fe alloys, J. Phys.:Metal Phys. 18 (1988) 1329-1341 の中に、Al₈₆Fe₁₄の TEM 像があり、最小 10nm 程度の準結晶(電子線回折で5回対称)の微結晶が含まれているとされています。また、as-quenched の準結晶試料の磁化曲線はなかなか飽和しない振る舞いを示しており明らかに超常磁性的です。その飽和磁気モーメントは 0.76 emu/g (4.2K), 0.63 emu/g (室温) であるが、結

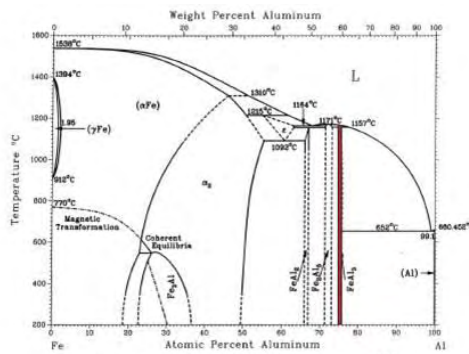


Figure 1: Fe-Al equilibrium phase diagram [5]

図1 Fe-Al の平衡相図

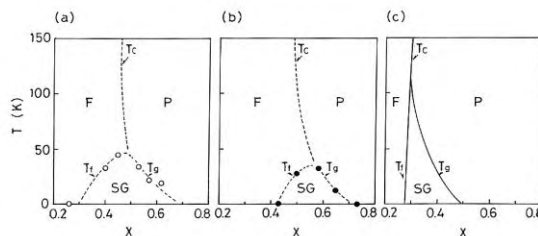


Fig. 9. Magnetic phase diagrams of Fe_{1-x}Al_x alloys. (a) the alloys produced on water-cooled substrates by FT-sputtering. (b) those produced on liquid-nitrogen-cooled substrates by FT-sputtering. (c) the bulk alloys produced by water quenching. [9,10]

図2 Fe-Al 合金の磁気相図

晶化した試料は強磁性的で非常に小さな飽和磁気モーメント 0.055emu/g (室温) しか示さないと書かれています。

おそらく、T様の試料も TEM でみると不均一で、作製の過程で準結晶が析出している可能性があるのではないかと思います。

AA: 佐藤勝昭 先生、H 試験場の T です。

お世話になります。突然の質問にもかかわらず、早速のご回答ありがとうございます。教えて頂いた資料、文献を調べてみます。丁寧なご回答を頂き、感謝の言葉がありません。

突然のメールでの依頼に対し、これほどの内容をしかも無償でご呈示いただけただことに驚くばかりです。私はいわゆる公設試の者で、企業さんからいろいろな依頼を受けますが、これほど丁寧に対応した記憶がありません。今後は私も先生に習ってできるだけの対応を心がけます。名工大の隅山先生にも御礼をお伝えいただけると幸甚です。取り急ぎ御礼申し上げます。今後とも宜しくお願い申し上げます。

1148. 磁壁のピンニング効果

Q: 私、T 大学M1の N と申します。磁性粒子の粒径と保磁力の関係について調べていますが、ピンニング効果とは一体、どのような効果なのですか？また、磁壁の移動とそのピンニング効果は何か関係があるのですか？

A: N 君、佐藤勝昭です。磁化反転には、磁化の回転によっておきる場合と、磁壁移動でおきる場合があります。磁性粒子のサイズが静磁特性長より小さいとその磁気構造は磁区にわかれず単磁区になります。このときの保磁力 H_c は、磁気異方性定数を K_u 、磁化を M_s とすると、異方性磁界 $H_K=2K_u/M_s$ で与えられます。一方、いくつかの磁区に分かれる場合は、はじめに磁壁移動が起き、最終段階で磁化回転がおきて全体の磁化反転が起きます。

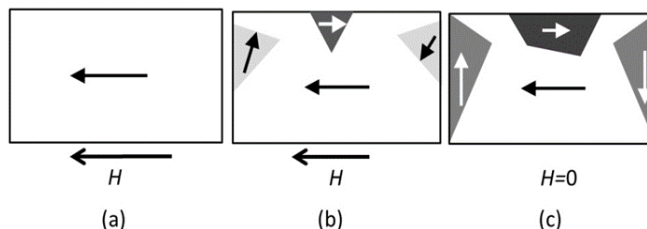


図3 磁気飽和状態から磁界Hを減少したときの磁区の変化

強い磁界を加えて飽和磁化状態にしたあと、磁界を減らしていくと、逆向きの微小磁区が発生します。これを、結晶成長のアナロジーから核発生と言います。さらに磁界を下げると、磁壁が動くことによって、逆磁区の面積が広がります。磁界を0にしても、逆磁区の面積はもとの逆磁区の面積には届かないので、残留磁化が生じます。さらに逆向きに磁界を加えると、磁壁が移動し互いに逆向きの磁区の磁化が打ち消し合います。このときの磁界が保磁力です。もし、核発生した微小磁区の磁壁が、どこかに引っかかって動けないとしますと、逆向き磁区は広がらないので、磁化反転しにくくなり永久磁石になります。これをピン止め(pinning)効果と言います。ネオジム磁石は、ピン止めできた永久磁石と言ってもよいでしょう。

AA; N です。丁寧に解説していただきどうもありがとうございます

補足資料 磁壁移動とピンニング

(a) 単磁区ナノ粒子集合体の保磁力は異方性磁界

ナノサイズの磁性微粒子では単磁区になっています。単磁区粒子では、磁壁移動がないので磁化過程は磁化回転のみによります。図4に示すように、材料内のすべての磁気モーメントが一斉に回転する場合の保磁力 H_c は異方性磁界 H_K に等しいと考えられ、

$$H_K = 2K_u/M \quad (1)$$

与えられます。これはかなり大きな値です。実際にはこんな大きな値にはなりません。それは、(b)に述べる磁壁移動があるからです。

(b) 磁壁の核発生がある場合の保磁力は異方性磁界よりかなり小さい

いったん磁壁が導入されると、磁壁は外部磁界で容易に動くことができ、磁化反転が起きやすくなります。図5にこの場合の磁区の様子を示します。

反転核が発生する外部磁界は、粒界の一部で異方性磁界が低下していたり、反磁界が局所的に大きくなっていたりすることで、 H_c は H_K よりも小さくなっています。式で書くと、

$$H_c = \alpha H_K - N M_0 \quad (2)$$

ここに α は異方性磁界の局所的低下を表す因子 ($\alpha < 1$)、 N は反磁界係数ですが、隣接する結晶粒からの影響も受けた値になっています。

(c) ピンニングサイトがある場合の保磁力

ピンニングサイトがあると、図6に示すように、磁壁はそこにトラップされていますが、いったんそのサイトから脱出

すると磁化反転が進行し、第2のピンニングサイトで磁壁がトラップされて止まります。ピンニングサイトと周りとの磁壁のエネルギーに差があることがトラップされる原因です。このエネルギーの差は異方性エネルギーの差であると考えられます。 $SmCo$ 磁石はこのタイプであるとされています。ピンニングサイトは結晶粒界、格子欠陥や不純物などによってもたらされるため、材料作製プロセスに依存します。

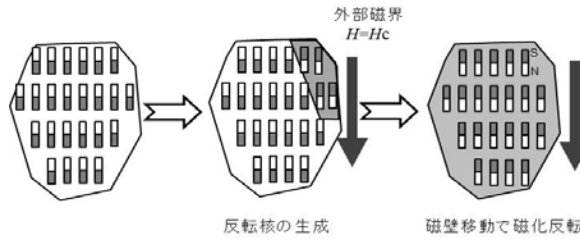


図4 核生成型磁性体における反転機構の模式図

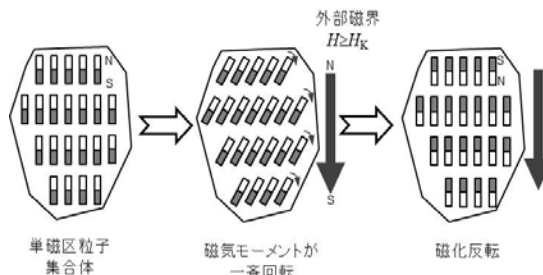


図5 単磁区粒子集合体における反転機構の模式図

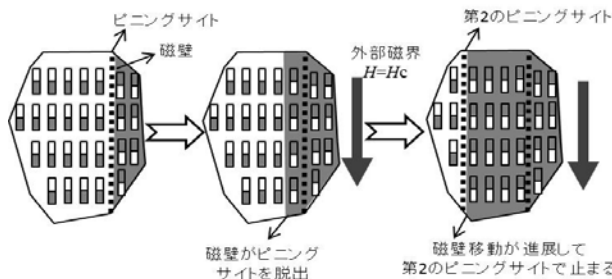


図6 ピンニング型磁性体の反転機構の模式図

1279. 鉄単結晶の磁気異方性

Q: 佐藤勝昭先生、K社Nと申します。

HPで「第9回スピエレクトロニクス入門セミナー資料」を拝見させていただきました。お教えいただきたいのは、結晶磁気異方性のページに掲載されている鉄単結晶の磁化曲線(図7)の出典です。可能であれば、知財の参考文献として引用させていただきたいと考えております。よろしく願い申し上げます。

A: N様、佐藤勝昭です。

本多先生・茅先生による有名なお仕事ですが、査読のある学術雑誌に掲載された論文は見つかりませんでした。近角先生の強磁性体の物理では、下記の東北大の紀要が引用されています。

K. Honda, S. Kaya: Sci. Rep. Tohoku Univ. 15 (1936) 721

なお、下記書物がよく引用されます。茅誠司：強磁性、岩波書店(1952)

AA: 佐藤先生、K社Nです。ご回答いただき、誠にありがとうございました。早速、書籍を探してみます。取り急ぎ、お礼まで。

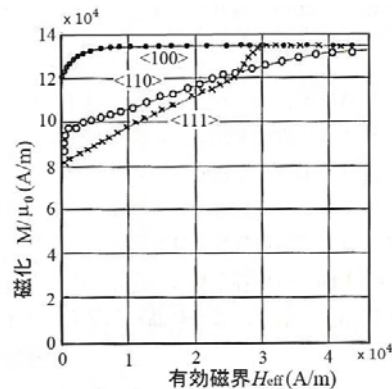


図6 Feの磁化曲線の結晶方位依存性(Kayaによる)

補足資料 Feは等方結晶なのに、なぜ磁気異方性を示すのか

[100]方向に磁界を加えると、図7に示すように、磁界方向の磁化をもつ磁区の体積が増加するように磁壁が移動して、ついに単磁区になって磁気飽和します。この磁壁移動は極めて弱い磁界で終了します。図6の[100]方向の磁化曲線に対応します。

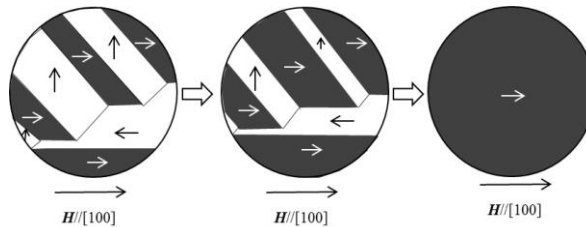


図7 Fe[100]方向に磁界を印加した場合

一方、磁界を[100]方位から45°傾いた[110]方向に加えた場合、図8のように[100]およびそれに垂直な[010]方向の磁化をもつ磁区は等価なので、両磁区の体積を増加するよう磁壁が移動し、極めて弱い磁界で、2種類の磁区のみで埋められてしまいます。このときの磁界方向の磁化成分は飽和磁化 M_s の0.71倍です。磁界を増加すると磁化は縦軸から離れ磁化回転しながら飽和に向かいます。これが、図6の[110]方向の磁化曲線です。

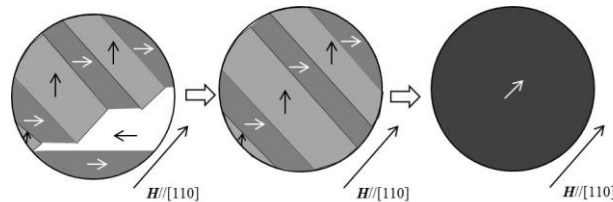


図8 Fe[110]方向に磁界を印加した場合

1297 強磁性体に関する質問

Q1: 佐藤先生、はじめまして。特許事務所に勤めます M と申します。強磁性体の特許出願で、特許庁の審判官に理解して頂けない部分があり、困っていることがございます。出願人の技術が正当に評価されることを願って、先生の教えを頂ければありがたいです。強磁性体に外部磁場をかけずに、その強磁性体のキュリー温度以上に加熱した後、そのキュリー温度以上の温度で外部磁場をかけると、自発磁化が発生するというのを理解して頂けません。審判官は、キュリー温度以上になれば常磁性体になるのだから、外部磁界をかけて、強磁性体になるはずはないと主張されて、おしかりを受けました。

上記のように自発磁化が発生することは理論として間違いないのでしょうか。もし、間違いでなければ、上記の審判官に上記理論を理解して頂くために、適切な書籍がございましたでしょうか。

A1: M 様、佐藤勝昭です。強磁性体の T_c 以上での磁化についての質問ですが、近距離秩序による局所的な磁化が残る可能性があります。私の経験ですが、 $CdCr_2Se_4$ という磁性半導体において、 $T_c=130K$ を超えて $150K$ くらいまで磁気光学効果が観測されていました。(ただし、磁界をかけています) T_c 以上では揺らぎが大きくなっているのでわずかな磁界でも近距離的には磁気モーメントがそろわないのではないかと思います。光で見ていると近距離秩序でも磁化があるように見えます。これを「自発磁化がある」と表現してよいのかどうか分かりませんが・・・。

Q2: 佐藤先生、早速、ご返事を頂き感謝致します。先生の丁寧なご検討に感謝致します。もう一つ、低温からキュリー点の近傍へ温度を上げてから (I-T 曲線上で磁化 I は小さくなる)、温度を再び、低温に戻した場合に、前記 I-T 曲線上で一旦小さくなった I は、初期の低温時の大きさには戻らないでよろしいのでしょうか。

A2: M 様、佐藤勝昭です。均質な強磁性体をキュリー温度以上に昇温し、再び低温に戻した場合、飽和磁化 I_s は元に戻るべきものです。もし、同じ磁界をかけても元に戻らないとすれば、飽和磁界が変化して、飽和磁化に達しなくなったと考えられます。また、不均質な超微粒子から構成されている場合では、磁界中冷却と無磁界冷却とで、I が変化することがあります。お尋ねの実験結果が、どの場合に当たるかは、ご質問だけからはわかりません。

AA: 佐藤先生、ご連絡が遅れ失礼致しました。真摯にご回答を頂き、ありがとうございます。感謝しております。先生からのご教示を参考に、依頼人の発明のご説明をさせて頂きたく思っております。どうかよろしく願い申し上げます。

(独)科学技術振興機構 研究広報主監

〒102-8666 東京都千代田区四番町 5-3 サイエンスプラザ

(2014年 3月 31日受理)