

第二巻「永久磁石の着磁と安定性」(第1版)

著者 山本日登志、大橋健

出版社 ネオジコンサル

まえがき (1)

第1巻「永久磁石の基礎と永久磁石測定方法」に続いて第2巻「永久磁石の着磁と安定性」を出版しました。今回は信越化学工業(株)の大橋健様に共同執筆お願いしました。前半の第1章の着磁が山本執筆、後半第2章の安定性が大橋健様になります。

ご存じの方も多いと思いますが、大橋健様は信越化学工業において長年Sm₂Co₁₇磁石の研究開発に従事、その後NdFeB磁石材料研究、磁石応用研究等長年磁石業界でご活躍されている方です。

文章の表記などは出来るだけ統一しました。ただ同じ磁石研究者といえども“磁石の見方”は微妙に異なります。そのため技術内容の解釈や表現方法はあえて統一していません。二人のやや高齢の磁石研究者の異なる“磁石の見方”をご興味頂ければ幸いです。

今回も多くのご会社や先生方にご協力頂きました。巻末に謝辞を記載しておりますが、この場を借りても感謝申し上げます。

少し先ですが、第3巻も執筆構想中ですので、また別途ご連絡します。

記 山本日登志

目次

まえがき (2)

第1巻「永久磁石の基礎と永久磁石測定方法」執筆のお話を山本さんからお聞きし、使用される立場に立った内容に感銘を受けました。また、山本さんのユニークな語り口調の文体も大変印象的で、些かですが内容や文章校正でお手伝いさせていただきました。

第2巻「永久磁石の着磁と安定性」では、私も「安定性」に関する後半部分の執筆を担当させていただきます。磁石の安定性は、表面的には着磁した磁石が、熱やその他外的要因によりどの程度減磁するかという簡単な現象です。しかし、その背後の要因は、磁石保磁力機構と結びついたもので、今でもミクロな立場からの研究が活発になされています。

本書は使用される立場に立ったものですので、その内容には立ち入りませんが、複雑な背景がある事は頭に留めていただければと思います。

共著者の山本さんは、元住友特殊金属の磁石研究者で、筆者とは長年ライバル関係にある立場でした。山本さんは材料研究のみならず、海外駐在等の経験も長く、英語も堪能です。そのため、IECの標準化作業の日本側委員も担当され、単なる材料研究者の枠を超えた方で、永くこの業界と開発に尽力されて来られました。筆者は会社の枠を越えて、山本さんとは長く親交を暖めて来ましたので、一緒に執筆できる事は望外の喜びです。本書が少しでも応用分野の皆様の役に立つことを祈念しております。

記 大橋 健

(2021年9月吉日)

第0章 本書の記述方法について	4
第1章 永久磁石の着磁	
1-1: 初磁化曲線と減磁曲線	5
1-2: 永久磁石の基礎知識	9
1-3: 永久磁石の製造工程と磁場配向	11
1-4: 等方性磁石と異方性磁石	18
1-5: 各種磁石の着磁特性	19
1-6: 現状の着磁特性の評価と課題	35
1-7: 着磁シミュレーションと新規着磁技術の展望	46
1-8: 永久磁石の保有するエネルギー	49
1-9: 着磁と磁壁移動	55
第2章 永久磁石の安定性	
2-1: 永久磁石の磁力	63
2-2: 永久磁石の減磁要因	63
2-3: 熱減磁の実際	63
2-3-1: 永久磁石の温度変化	64
2-3-2: 永久磁石の耐熱性と熱減磁	66
2-3-3: 各種磁石の熱減磁の実際	69
2-3-4: ボンド磁石の概要	79
2-3-5: ボンド磁石の耐熱性と熱減磁	82
2-4: 熱減磁とは?	83
2-4-1: 熱減磁のメカニズム: 減磁曲線での説明	84
2-4-2: 熱減磁のメカニズム: 現象論	86
2-5: 熱減磁以外の減磁	88
2-5-1: 逆磁場印加減磁とその他減磁	88
2-5-2: その他減磁	90
2-6: 磁石の耐食性と表面コーティング	92
参考技術情報 (山本);	98
参考技術写真 (山本);	100
主な用語の平易な解説 (山本);	102
参考図書、参考 Web;	109
謝辞;	110
著者略歴と一言;	111-112

第0章 本書の記述方法について

1. 単位系について

第1巻「永久磁石の基礎と測定方法」については、パーミアンス係数の説明の際に混乱が無いように単位系はc g s 単位系を採用した。そのため専門用語も例えば「磁界」では無く「磁場」という表現で記載した。

本書第2巻ではそれら説明の必要もない事や本書の主な読者であるモータ等の設計技術者が理解しやすいMKS 単位系 (SI 単位系) で表記した。

2. 注または脚注について

本文の内容の中でわかりにくい箇所には、注または脚注として最下段に解説した。

3. 引用文献について

引用文献については件数がそれほど多くないことと平易にチェック出来るように個々の図、表のキャプションの下に記載している。

4. 補足解説；

書籍全般に関連する技術情報を補足解説としている。

5. 参考技術情報、参考技術写真；

巻末に一般的な永久磁石の参考情報及び参考技術写真を掲載した。

6. 用語の平易な解説

永久磁石初心者の読者のために簡単な用語解説を最後に追記した。厳密な用語辞典ではなく、あくまで平易な用語解説である事をお断りしておく。

以上

第1章 永久磁石の着磁

1-1：初磁化曲線と減磁曲線

永久磁石は製造直後の状態では磁化されていない、いわゆる消磁状態である。磁石製造工程中に高温に加熱されて起こるためこれを熱消磁状態とも言う。この熱消磁状態はエネルギー的に最も安定な状態である。この消磁状態の磁石を磁化させる工程が着磁である。

まず初磁化曲線、減磁曲線から説明する。

初磁化曲線とは磁石が消磁状態から以下の図 1-1-1 のように磁界 H を増加（これを印加という）させ飽和磁化 J_s になるまでの磁化 J の変化を示した曲線である。（注1）なお最初にかけた磁界（印加磁界という）をプラス方向と仮定するとこの曲線は第一象限の曲線と言う事になる。本書ではこの初磁化曲線の事を必要に応じて着磁曲線とも呼ぶ事にする。消磁状態から磁気を帯びる過程と言う意味で着磁過程を示す曲線であるためである。但しあまり一般的な名称では無い事をお断りしておく。

一方で減磁曲線は図 1-1-2 のように磁界をプラス方向に着磁した後にマイナス方向に磁界をかけた時の曲線であり、この曲線は第2象限の曲線と言う事になる。

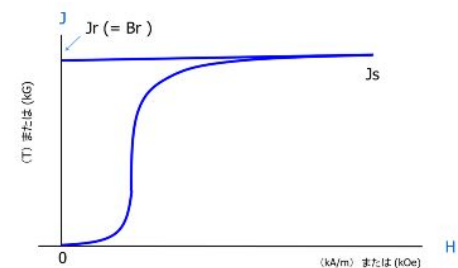


図 1-1-1 J-H 初磁化曲線の一例

(注1) 磁化 J ; 最新 JIS 規格では磁化 J は磁気分極 J と呼ぶ事を推奨している。ただこの磁気分極という名称が本書のモータ設計者等の読者にはなじみが少ないのでは？と考え従来からの“磁化”という用語で説明する事をご了解願いたい。

第2章 永久磁石の安定性

一般の人は、永久磁石の発生する磁力(磁場・磁束)が、永久に不変であると思われるかもしれませんが、しかし、モータ設計を行われている皆さんは、モータに使った時に永久磁石の温度が上がったり、逆磁場が印加されたりした場合、永久磁石が減磁する事を良くご存じだと思います。一方、モータ設計者の方々も、何故永久磁石が減磁するかについて、その原因を必ずしも理解されていないかもしれません。本章では、熱減磁を中心にその実際とメカニズムを説明したいと思います。また、永久磁石の安定性については、永久劣化として酸化劣化(錆)も重要で、その対応として磁石コーティングは必須です。永久磁石の耐食性についても後半で説明します。

2-1:永久磁石の磁力

永久磁石減磁の説明をする前に、既に前章で説明しましたように、磁石の発生する見かけの磁力には次の3つの段階があります。

1. 熱消磁状態；製造時の状態で、マクロには磁力(磁場・磁束)がないように見える。俗な言い方では鉄がくつきません。
2. (フル)着磁状態；磁石に十分な外部磁場が印加され、磁石本来の磁力が発生した状態。
3. 減磁状態；磁石への温度や逆磁場印加などにより、フル着磁された状態より磁力が低下した状態。

上記の1.と2.については、既に第1章で説明しました。第2章では、3.の減磁について説明します。減磁の要因は温度による熱減磁だけではなく、熱減磁を主に取り上げ、その実際と何故減磁するかにつき説明します。その後、逆磁場印加による減磁や放射線減磁につき触れます。

2-2:永久磁石の減磁要因

永久磁石の減磁には下記のような種々の要因があります。1.～3.の減磁は、再度磁化方向に磁場を印加すると、基本的には元の磁力に戻ります。一方、4.の腐食劣化は磁石としての組織を失わせてしまう永久減磁ですから、元の磁力には戻りません。次の節で、まず、

1.の熱減磁を取り上げます。

1. 磁石が室温以上の温度に保持されて起きる**熱減磁**
フェライト磁石は低温に保持された時に減磁する低温減磁がある
2. 磁石に着磁磁化方向の逆方向磁場が印加されて起きる**逆磁場印加減磁**
3. 磁石に放射線・粒子線を照射して起きる**放射線減磁**
4. 磁石が湿度・温度の高い環境に暴露されて起きる腐食(錆)劣化 (**永久減磁**)

2-3 熱減磁の実際

本節では減磁の中で、一般的な熱減磁の実際について説明します。高い温度に暴露された

永久磁石の発生する磁束Φが減少するのは、「永久」磁石という言葉と矛盾しますが、永久磁石の磁気は温度変化し、ある温度を超えると磁束Φが減少して元の値に戻らない事を理解しておく必要があります。ただ、磁束Φの温度変化は可逆部分と非可逆部分があるので、本節では主に非可逆部分について説明します。

2-3-1:永久磁石の温度変化

本節では熱減磁を取り上げますが、その説明をする前に、永久磁石が温度に対してどのように変化するかを知っておく必要があります。磁石の磁性は、一般的に昇温するに従い、磁気特性が減少します。磁気特性の温度変化には、降温すると元に戻る可逆部分と、元に戻らない非可逆部分があります。ある形状の磁石が発生する磁束Φを式で表すと、下記のようになります。

$$\Phi(T, H) = \Phi_{\text{rev}}(T, H) + \Phi_{\text{irr}}(T, H)$$

上式の可逆Φ_{rev}(T, H)についてまず説明します。磁石が発生する磁束Φの源は、磁石の磁化M⁰にあります。下記の図2.1のように、Mは温度が上がるに従い減少し、ある温度以上になると磁化が消失します。この磁化が消失する温度をキュリー温度(点; T_c)と呼びますが、この変化は可逆的で、温度が下がると室温になると磁化Mは元の値に戻ります。永久磁石は一般に強磁性体であり、その磁化温度変化は図のような上向き凸の減少を示し、これは物質本来の性質です。磁性物理からの説明は可能ですが、磁石ユーザーにはそこまでの必要はないと思います。興味があれば、磁性物理の本を見て頂くのが良いでしょう¹⁾。

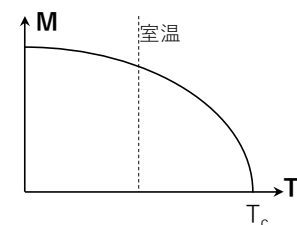


図 2.1 永久磁石磁化Mの温度変化

*註 a)；本節の上記部分では、磁化としてMを用いています。磁化Mと磁気分極Jの関係は、SI単位系では下記のようになります。

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + J, \quad J = \mu_0 M$$

本書では、最初に述べたように磁石ユーザーの方を対象としているため、「磁気分極J」を「磁化」と便宜的に呼ぶようにしました。しかし、永久磁石の物質としての固有磁性を議論する場合、磁気分極Jではなく、磁化Mで議論する必要があります。磁石の固有物性は磁化Mであるためです。そのため、材料について説明する本節では主に「磁化M」で議論を進めます。

永久磁石に関する主な用語の平易な解説

(あくまで平易な解説を意図したもので厳密な用語辞典ではありません：山本作成)

あ

印加磁界；

磁石に磁界を加える事を「磁界を印加する」と言い、その磁界が印加磁界である。磁石を着磁するのも磁界を印加する作業である。本書では着磁の磁界の強さを変えたデータも掲載しているので、その際は着磁磁界という表現も使っている。

(磁気)異方性エネルギー E_A & 異方性磁界 H_A ；

直観的にわかりにくい物理量と思う。着磁された磁石の NS の磁化方向はエネルギー的に安定な方向であり、異方性エネルギーはこのエネルギーの大きさに相当する。仮に NS 方向に直角に磁界を加えても NS の磁化方向はその直角方向には容易に向かないという事である。

このエネルギーを磁界の強さと言うある指数で表した物理量が異方性磁界 H_A である。NS 方向に直角に磁界を増加していくと、この異方性磁界 H_A と同じ印加磁界をかけて磁石の磁化は飽和磁化に到達する。

一軸性；

これは磁石となるための重要な結晶構造である。そもそも強力な磁石は NS の磁極が出やすい結晶構造である事が必要条件である。これは磁石の持つ結晶軸の一つ例えば c 軸方向が a 軸方向とは非常に異なる結晶構造を有した時に磁石になりやすい。これを本書では 1 軸性と言う表現で説明した。

か

角形性&角形比；

減磁曲線の特性評価パラメータの一つである。永久磁石の特性として、従来の評価パラメータ； B_r , H_{cB} , H_{cJ} , $(BH)_{max}$ では十分な評価が難しい。高性能モータ設計に対応するために角形性 Hk (角型比とも言う) という評価パラメータが最近使われている。角形性については第 1 巻に詳しく解説した。

経時変化；

熱減磁のひとつ。永久磁石を長期間或る特定の条件下におくと非常にわずかであるが減磁する。これを経年変化と呼ぶ。一方永久磁石は短時間でも減磁しこれを熱減磁という。

今までの説明だけでと、磁束 Φ (T, H) は可逆成分だけで、不可逆部分はないように思えるかもしれませんが。ところが、ある形状の磁石が発生する磁束密度 Φ (T, H) の温度変化は、磁化 M (T) だけでは決まりません。磁気ヒステリシス曲線 (J-H カーブ；図 2.2) の磁化が横軸を切る磁場 H_{cJ} (T) (J 保磁力と呼ぶ) も、温度変化する事を考える必要があります。磁石ユーザの方には少し厄介な事に、 H_{cJ} (T) の温度変化は、 M (T) のそれとは異なります。下記図 2.2 のヒステリシス曲線温度変化のように、一般的に、 M (T) より H_{cJ} (T) の温度変化の方が大きい事が多いのです。詳細は後程説明しますが、これにより Φ_{irr} (T, H) の部分が生じるのです。

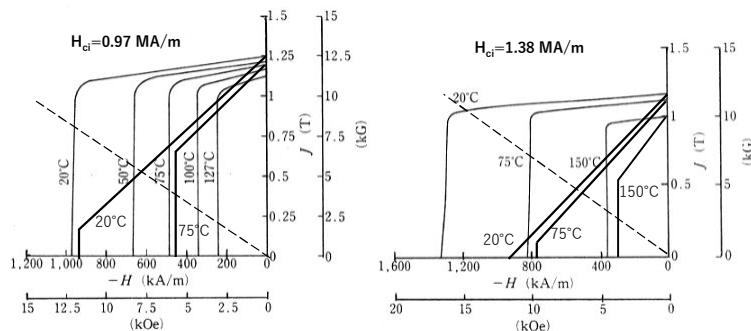


図 2.2 磁気ヒステリシス曲線 (J-H と B-H) の温度変化例 (NdFeB 磁石； H_{ci} 違い)
J-H カーブ(細線)・B-H カーブ(太線)とあるパーミアンス係数線(破線)

この温度変化の違いは、磁気特性 M (T) と H_c (T)^{b)} を決めている磁性の源が異なる温度変化をするためです。 M (T) は原子磁気モーメント間の交換相互作用^{c)}、 H_c (T) は主に原子磁気モーメントに働く結晶場^{d)} による結晶磁気異方性^{d)} に由来しているため、異なる温度変化をするのです。典型的希土類磁石である 2-17SmCo 系希土類磁石と NdFeB 系希土類磁石の磁気特性温度変化率 α を表 2.1 に示します。100°C までの温度変化率を示しますが、 H_c (T) の変化の方がどちらの磁石でも大きくなっています。

-
- *註 b)；以降では保磁力を H_c と表記します。区別が必要な場合のみ、 H_{cJ} ・ H_{cB} と表記します。
 - *註 c)；交換相互作用の詳細説明は省きますが、磁石の磁性原子スピ間に働き、スピンを並行にしようとする量子力学的相互作用で磁石磁性の起源です。要点だけ言いますと、スピンの向きが揃った方が電子同士近づけなくなり、エネルギーが下がるためです。
 - *註 d)；結晶場は磁性原子磁気モーメントが周囲原子の結晶電場を感じて生じる、2 次量子力学作用で、保磁力 H_c に関係します。交換相互作用と結晶場では、その起源が異なるため、温度変化の度合いが異なるのです。

著者略歴と一言

謝辞

本書を執筆するにあたり以下多くの方々にコメントや助言を頂きましたのでこの場を借り厚く謝辞を申し述べたいと思います。

謝辞（敬称略）

長崎大学 理事・副学長 名誉教授 福永博俊
長崎大学 大学院 工学研究科 教授 中野正基
東京工業大学 未来産業技術研究所 教授 進士忠彦
同志社大学 名誉教授 石原好之
横浜国立大学 理工学部 非常勤講師 川井哲郎（元日立金属）
日本電磁測器（株） 取締役 技術開発部長 堀充孝
元大同特殊鋼（株）技術開発研究所 主席研究員 溝口徹彦
元住友特殊金属（株） 遠藤政治

また本著書作成するにあたり磁石試験片提供あるいはデータ提供にご協力頂いた以下の会社にたいしてもお礼申し上げます。

ご協力会社

信越化学工業（株）
大浜商事（株）
天和磁材（中国）
大同特殊鋼（株）
日本電磁測器（株）
（株）KRI

また本書の表紙デザイン作成は元住友特殊金属（株）松永康弘様に、また裏表紙の写真は KRI（株）松本信子様のご提供によるものです。お礼申し上げます。



山本 日登志
ネオジコンサル代表
（株）KRI 非常勤勤務

生まれ；広島県福山市、現住所；京都府京都市、最終学歴；九州大学大学院博士課程
勤務歴 1979； 住友特殊金属入社、1983；佐川真人グループの中でネオジム磁石発明・
開発、その後米国駐在2回、IEC 国際規格/永久磁石 WG 主査、2010 年；日立金属退社、
2011 年；KRI 勤務、現在は（株）KRI にてアルバイト契約で継続勤務中。
趣味；テニス、その他；世界人名辞典(2006 年版)に「日本の磁石研究者」として掲載

著者からの一言；脱線する箇所もありますが、読み物として読んでもらえるとう幸いです

山本 HP； ネオジコンサル

<https://hitoshiad26.sakura.ne.jp>



大橋 健



信越化学工業（株）勤務

生まれ；岡山県倉敷市、現住所；東京都世田谷区、最終学歴；東北大学大学院修士課程工学博士

勤務歴 1978； 信越化学入社、サマリウムコバルト磁石開発、1983～；ネオジム磁石開発、1991～；永久磁石磁気回路・磁気回路設計開発、2010年；本社勤務（研究企画、途中4年程電池材料開発に従事）

趣味；山登り、サイクリング、湧き水探索

著者からの一言；本書は第1巻と違い、山本さんと分担執筆しました。私の執筆が遅れたため、山本さんにはご迷惑をおかけしましたが、磁石ユーザの皆さんのお役に立てれば幸いです。