

＜モータ設計技術者および磁石評価技術者のための永久磁石入門書シリーズ＞

**第一巻 「永久磁石の基礎と永久磁石測定方法」
(第3版)**

著者 山本日登志

出版社 ネオジコンサル

まえがき

本書は永久磁石の入門書である。ただし永久磁石材料の研究開発の為の本では無く、永久磁石を使ったモータなどの設計技術者あるいは永久磁石の測定評価に日々携わる技術者の為の入門書のである。増版、改定により今回は第3版である。

まず冒頭永久磁石で古くから使用されている cgs 単位系の有効性を述べた。次に本読者は電気系の大学卒業生が多いか？と私見し、まずは電気と磁気の類似性とその違いを簡単に説明、さらに永久磁石の応用や評価のための基本的理解を深めて頂く事も重要か？と思い永久磁石のパーミアンス係数、反磁界、永久磁石減磁曲線の見方や考え方等を平易に解説している。

永久磁石の測定方法としては直流 BH トレーサ、パルス BH トレーサ、VSM、フラックスメータ等の測定装置の原理、測定上の問題点を説明すると共に出来るだけ数多くの測定事例を御提供する事とした。

また著者が現在行っている磁石の内部磁場測定の研究をご参考までに簡単にご紹介した。最後に永久磁石の標準である IEC 国際規格について解説した。

一件お断りである。

本書籍の中で cgs 単位系の有効性を説明したが、近年ほとんどの学会発表原稿や正式報告書には須らく国際単位系 SI (MKS) を使う事が義務づけられている。その為出典引用の関係で本書のデータ中に少なからず国際単位 SI 表記のデータが混在する事をご了承頂きたい。

本書読者は冒頭述べたように永久磁石材料専門の研究者では無く、永久磁石の応用や磁石評価をする方を念頭に、出来るだけ平易に解説する事を心掛けたつもりである。読者の忌憚ないご意見を頂けると幸甚である。

なお第2巻（着磁、熱減磁等の内容）についても現在執筆準備中であり、2020年の末頃を目途に出版発行予定である。

2020年3月

著者

目次

1. 磁気の単位 c g s 単位系の有効性	4
2. 電気回路と磁気回路の類似性と差異	6
3. パーミアンス法による磁気回路の設計	9
4. 反磁場とその理解の重要性及びパーミアンス係数	19
5. 永久磁石の減磁曲線の見方	
(1) 減磁曲線とその解釈	22
(2) 減磁曲線の単純化したモデル図	26
(3) 減磁曲線の実例	32
6. 永久磁石の温度特性	37
7. 永久磁石測定装置	
(1) 直流 BH トレーサと測定事例	43
(2) パルス BH トレーサと測定事例	50
(3) VSM (振動試料型磁力計) と測定例	83
(4) フラックスメータによる全磁束測定	100
8. 微小ホールプローブによる磁石内部磁場の測定 (研究紹介)	107
9. 永久磁石の国際規格について	112

表 9.6 市販 NEOMAX-35EH の測定場所と測定温度の違いによる測定値差異(SI 単位系)

試料	測定場所	Br (T)	Hcb (kA/m)	(BH)max (kJ/m ³)	Hcj (kA/m)	Hk (kA/m)	測定温度 (°C)
NEOMAX-35EH	H社	1.211	942.1	284.6	-	-	22.2
NEOMAX-35EH	T社	1.197	927.9	277.3	-	-	20.0
-	誤差(%)	1.17	1.53	2.63	-	-	-

表 9.5 と表 9.6 は、市販ネオジム焼結磁石 NEOMAX の 2 材質の同一試料を 2 社で測定した例である。両社で測定装置、校正方法等が異なるので単純には比較出来ないが、測定値の温度の影響は温度係数の大きい H_{cj}、H_k の値になんらかの差異を及ぼしていると推察される。一方、B_r、(BH)_{max} は温度係数そのものが H_{cj} の温度係数よりも少ないので、測定装置の磁化 J の検出方法や校正方法等に両社の差異が出たのでは？と思われる。



PRIUS と著者 (千葉県幕張にて、2001 年)

最後に永久磁石測定方法標準化に関して、信越化学磁性材料研究所の美濃輪武久氏がレアメタルニュースに大変有益な提言をされていたのでその抜粋をご紹介します。

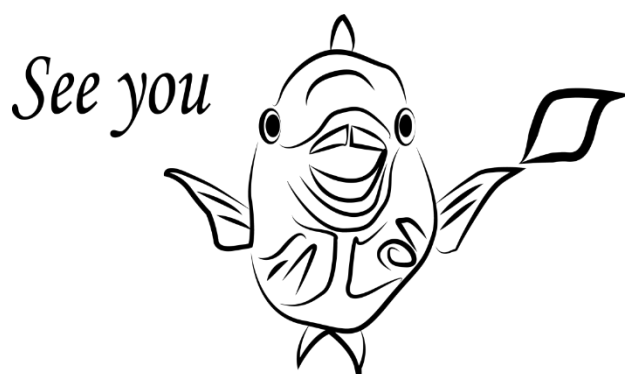
ここまで磁石測定評価方法に関して色々解説したが、国内あるいは国際的な標準化がなされているか？という客観的な観点からは残念ながらまだまだ多くの課題が残されていると思う。この美濃輪氏の御提言が大変貴重なコメントでは？と思いあえて最後に引用させて頂いた。

「日本の磁石業界の問題として、営業で用いられる焼結磁石のデータが正確でない、との見方が国内外需要家の一部から出ている。磁石業界では測定方法が統一されていないため各社のデータを単純に比較出来ない。営業上わずかながら良いデータにかさ上げされる、といった指摘もある。モータ性能の試算と実際に試作したモータの性能が異なる場合、磁石性能が原因なのか、あるいはモータ設計が原因なのか調べる必要がある。

こうした課題を解決するためには、中立公正な機関が統一的な測定方法で磁石性能データを計測するなど、業界として具体的な対応を取るべきと思う。

レアメタルニュース No2368 (H20.10.1) 信越化学 美野輪磁性材料研究所長談

(役職名は当時にて掲載)



ではまたどこかでお会いしましょう！

<御参考技術情報> 希土類鉄ボロン化合物 R₂Fe₁₄B の物性値

R ₂ Fe ₁₄ B化合物	飽和磁化 I _s (T)	キュリー点 T _c (K)	異方性定数 K(MJ/m ³)	異方性磁界 H _A (MA/m)	(BH) _{max} 理論値 (kJ/m ³)
Y ₂ Fe ₁₄ B	1.42	571	1.41	1.59	400
Ce ₂ Fe ₁₄ B	1.17	422	1.76	2.39	272
Pr ₂ Fe ₁₄ B	1.56	569	6.79	6.93	484
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.6	586	5.36	5.33	509
Sm ₂ Fe ₁₄ B	1.52	620	plane	—	460
Gd ₂ Fe ₁₄ B	0.893	659	1.12	2	158
Tb ₂ Fe ₁₄ B	0.703	620	7.73	17.51	98
Dy ₂ Fe ₁₄ B	0.712	598	5.34	11.94	100
Ho ₂ Fe ₁₄ B	0.807	573	3.03	5.97	129
Er ₂ Fe ₁₄ B	0.899	551	plane	—	160
Tm ₂ Fe ₁₄ B	0.925	549	plane	—	263
Lu ₂ Fe ₁₄ B	1.183	535	—	—	280

補足説明

- R₂Fe₁₄B 化合物；
ネオジム鉄ボロン磁石のこの2：14：1の組成比を有する化合物がそもそも存在する事が佐川氏らをはじめとする技術者で発見されたことにそもそもその歴史は由来する。新規な高性能磁石の研究開発はまず優れた磁気特性を有する化合物の新たな探索と発見が始まると言っても良いであろう。そこにはなんらかのセレンディピティが必要と私見する。(著者独断ではありますが)
- 飽和磁化；
まず高い飽和磁化を有する事が重要である。これは軟質磁性材料と同様。
- キュリー点；
磁石材料は一般にキュリー点が低く温度係数の大きい事が欠点である。
- 異方性定数、異方性磁界；
軟質磁性材料と異なるのはこの値が大きいというのが特徴である。異方性定数の表でSm₂Fe₁₄B、Er₂Fe₁₄B、Tm₂Fe₁₄Bではplaneと表記している。これは磁化方向が面内(plane)異方性である事を示している。面内異方性の材料はそもそも面内で磁気モーメントが容易に動くので、磁気モーメントが動きにくいのが磁石材料なので磁石材料の選択肢にはなり得ない。
- 最大エネルギー積 (BH)_{max} 理論値；
飽和磁化の値から (BH)_{max} の理論限界値が計算で求められる。これ以上の最大エネルギー積を有する磁石はこの化合物からは実現出来ない。さらに実際の市販磁石では磁石の配向度、不可欠な液相の存在等の要因があるので、この理論値にはならない。

参考図書、参考ウェブ、参考文献

参考図書、参考 Web、参考文献は以下以外にも多くありますが、紙面の関係で割愛させていただきましたので、ご了承下さい。

参考図書

佐川真人ら「永久磁石」(アグネ技術出版、2007)

大橋健ら「希土類永久磁石」(森北出版、森北出版、1999)

佐川真人ら、「希土類磁石」(日刊工業新聞社、2012)

太田恵三「磁気工学の基礎 I、II」(共立出版、1973)

大川光吉「永久磁石磁気回路入門」(総合電子出版、1994)

* 川西健司ら「磁気工学ハンドブック」(朝倉書店、1998)

R.M. Bozorth, Ferromagnetism (D.V. Nostrand, 1951)

参考 Web

信越化学工業 ; www.shinetsu.co.jp

日立金属 ; www.hitachi-metals.co.jp

TDK ; www.tdk.co.jp

大同特殊鋼 ; www.daido.co.jp

東英工業 ; www.toeikogyo.co.jp

日本電磁測器 ; www.j-ndk.co.jp

JABM (日本ボンド磁性材料協会) ; jabm.la.coocan.jp

IEC (International Electrotechnical Committee) ; <http://www.iec.ch>

日本金属学会 ; jim.or.jp

日本磁気学会 ; www.magnetics.jp

電気学会 ; www.iee.jp

Neomag ; www.neomag.jp

(このネオマグ社 Web の「磁石用語辞典」は磁石初心者には大変参考になると思います。)

参考文献

(第7章-2)

林、平成31年3月電気学会全国大会、S20-6 及び電気学会研究会資料 ; MAG-14-174

諏訪、三輪、榎戸、有泉、電気学会マグネティックス研究会、MAG-18-088

堀、永田、富田、電気学会マグネティックス研究会、MAG-18-196

(第8章関連)

山本、松本、小林、漆畑、日本金属学会春期講演大会予稿集、272 (2018)

山本、松本、小林、漆畑、電気学会産業応用部門大会、3-71 (2018)

謝辞

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

特に信越化学大橋健様には本書籍の全体構成、重要コメント追記のアドバイスや書籍内の書式、フォント、表記等々修正チェック等の膨大な具体的な作業の御協力を頂きましたので、とりわけ深く深謝したいと思います。また信越化学（株）様から表紙のネオジム磁石の写真及び巻末の磁石データ資料のご提供を頂きましたのでお礼申し上げます。

信越化学 大橋 健
長崎大学理事・副学長 名誉教授 福永 博俊
元日立金属 徳永雅亮
東英工業 有泉豊徳

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や大学にたいしてもお礼申し上げます。

信越化学（株）
セイコーインスツル（株）
愛知製鋼（株）
東英工業（株）
日本電磁測器（株）
DMT（株）
長崎大学工学研究科電気・情報科学部門中野正基研究室
（株）KRI

また本書の表紙デザイン作成と裏表紙の写真提供は元住友特殊金属（株）松永康弘様に作成頂いたものです。また書籍中の挿絵は（株）KRIの松本信子さんに作成頂きました。あわせてお礼申し上げます。

著者略歴と一言



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(1951 生まれ)、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、磁石の読み物として気楽に読んでもらえると幸いです

また現在 第 2 卷（着磁、熱減磁等の内容）を執筆準備中で、

2020 年末頃目途に出版販売予定です。

