

# 磁性複合材料

—圧粉磁心とボンド磁石—

小林久理眞【監修】

株式会社 豊田中央研究所【編】

田島 伸【著】

コロナ社

## まえがき

本書の目的は、自動車や強電用途の圧粉磁心とボンド磁石の研究開発に役立つと思われる技術・知識を説明することにある。内容としては、これらの材料の基礎から具体的な応用まで、全体を網羅している。もちろん、不足した内容は、すべて筆者の責任である。なお、本書では、高周波ノイズフィルタや電磁波吸収体については、割愛していることを付言しておく。

筆者は、大学から企業で、一貫して無機・金属系材料の研究開発に従事してきた。材料研究には、現在、AIなどが利用されつつあるが、いまだに経験や職人芸的な部分が多い。本書では、筆者の経験で、自分自身が習得に苦勞したことや、理解したことで研究に大いに役立った内容をできるだけ記載するようにした。加えて、基礎的かつ広範囲な情報も記述した。筆者は、このような知識や技術を習得することで、若手であってもベテラン研究者の経験や職人芸的な技術に近づけるものと考えている。叢書からの知識や技術習得は、経験や年齢と無関係だからである。

筆者が所属する豊田中央研究所（以下、当所）は、トヨタグループの一つである。そのため、本書で紹介する技術も、自動車関係が多い。他分野の研究者・技術者には、物足りない部分があると思うが、それは筆者の限界であるので、ご容赦いただきたい。

最後に、本書の執筆の機会を与えてくれた当所・前代表取締役所長・菊池昇氏に深謝する。また、本書の監修を引き受けていただいた静岡理工科大学・小林久理眞名誉教授に感謝する。加えて、本書作成にご協力をいただいた以下の当所の関係者にも感謝する（順不同、敬称略）；宮木正彦，佐藤和夫，高尾尚史，小野英一，稲垣伸二，服部毅，中井英雄，高田幸生，大坪将士，ファンジョンハン，松本伸彦，難波雅史，平本健二，前田義隆，浦田信也，高橋健

一、菊地直人，小島崇，代永彩夏，吉川信明，平井宏俊，大庭伸子，岡本篤人，武市憲典，菅原朋子，池畑秀哲，近藤瑠歩。

なお，当所のデータ・研究成果は，当所の研究者各位の熱意と取組みによるものであることを付言しておく。

さらに，本書へのデータ利用を許諾していただいたトヨタグループ各社にも感謝する；トヨタ自動車（大石雄介），デンソー（野々山龍彦，河村亮，中村裕太），アイシン（神谷直樹），愛知製鋼（御手洗浩成，三嶋千里）。本書執筆にあたって，いろいろな情報をいただいた以下の各位にも感謝したい；九州大学：尾崎由紀子教授，JFE スチール：高下拓也，東北大学：杉本論教授，物質・材料研究機構：広沢哲。データや技術情報の掲載を許可していただいた以下の各社にも感謝する；日本製鉄，神戸製鋼所，ヘガネスジャパン，昭和電工マテリアルズ，大同特殊鋼，住友電気工業，ダイヤモンド，エプソンアトミック，アルプスアルパイン，JFE スチール，戸田工業，Magnequench，ダイドー電子，日亜化学工業，住友金属鉱山。

本書が，読者各位に少しでもお役に立てば，望外の喜びである。なお，研究（特に材料研究）には，positive thinking と「思い込み」が必要であることを助言しておきたい。最後に筆者のモットーを。

LLAP (Live Long And Prosper) & May the Force be with you!

2023 年 1 月

田島 伸 (JG2QUM)<sup>†</sup>

#### 【本書について】

本文中に記載している会社名，製品名はそれぞれ各社の商標または登録商標です。本書では®やTMは省略しています。また，会社名の表記において（株）や株式会社は省略しています。

なお，2023 年 1 月現在，「昭和電工マテリアルズ」は「レゾナック」，「日立金属」は「プロテリアル」へ社名を変更していますが，旧社名での製品名，引用・参考文献の表記があり，読者の混乱を避けるため，本書では旧社名で表記しています。

<sup>†</sup> 筆者のアマチュア無線局免許状のコールサインである。

# 目 次

## 1. 序 論

1.1 圧粉磁心とボンド磁石について	1
1.2 電磁気学および磁性材料に関する科学技術の歴史	2
1.3 自動車の歴史	5
1.4 磁性材料の発展に向けて	7

## 2. 磁性概論と強磁性材料

2.1 磁気 の 単 位	9
2.2 電磁気学の基礎	12
2.2.1 ボルタの電池	12
2.2.2 クーロンの法則	13
2.2.3 ガウスの法則	14
2.2.4 エルステッドの発見	14
2.2.5 ビオ・サバールの法則とアンペールの法則	15
2.2.6 ファラデーの電磁誘導の法則	18
2.2.7 マックスウェルの方程式	19
2.2.8 電磁気により物質間に発生する力	23
2.3 強磁性体の起源	25
2.3.1 電子と磁性の関係	25
2.3.2 原子, イオンに局在する電子の磁性	26
2.3.3 強磁性の起源 (磁気モーメントが揃う理由)	31
2.3.4 遍歴電子による磁性	36

2.4 磁気特性による物質の分類	45
2.4.1 常磁性体	46
2.4.2 反磁性体	47
2.4.3 反強磁性体	48
2.4.4 強磁性体：フェロ磁性体	49
2.4.5 強磁性体：フェリ磁性体	49
2.5 強磁性材料の特性	51
2.5.1 強磁性材料の磁化曲線	52
2.5.2 磁気異方性	57
2.5.3 磁区構造	63
2.5.4 単磁区粒子	69
2.5.5 永久磁石の保磁力機構	73
2.6 磁気損失（鉄損）	78
2.6.1 ヒステリシス損失	78
2.6.2 渦電流損失	80
2.6.3 外部応力の影響	85
2.7 強磁性材料の温度依存性	87

### 3. 実用化されている強磁性材料の特性と評価方法

3.1 本書で扱う強磁性材料について	89
3.2 軟質磁性材料	90
3.2.1 Fe（純鉄，電磁軟鉄など）	91
3.2.2 鉄鋼材，圧延鋼板	96
3.2.3 鉄合金系	98
3.2.4 アモルファス合金およびナノ結晶材料	111
3.2.5 金属ガラス	115
3.2.6 酸化物系	116
3.3 硬質磁性（永久磁石）材料	121
3.3.1 鉄鋼系磁石材料	122
3.3.2 鉄酸化物系磁石材料（フェライト系）	123

3.3.3	希土類磁石材料	126
3.3.4	その他の金属間化合物系	133
3.4	磁性材料および磁性粉末の評価方法	134
3.4.1	磁気特性の評価方法	134
3.4.2	粉末特性の評価方法	144
3.4.3	粉末成形体の評価方法	148

## 4. 磁気応用部品・機器の動作原理

4.1	電磁気工学の基礎	151
4.1.1	コイル	151
4.1.2	磁束の発生と逆起電力	153
4.1.3	コイルのインダクタンスと磁気回路	153
4.1.4	磁気エネルギー	155
4.1.5	コイルの電気的な動作	157
4.2	反磁界とギャップの影響	159
4.2.1	反磁界	159
4.2.2	磁気応用に及ぼすギャップの影響	164
4.2.3	漏れ磁束・フリンジング磁束の影響	168
4.3	モータ	169
4.3.1	直流モータ	169
4.3.2	ブラシレス直流 (BLDC) モータ	174
4.3.3	誘導モータ	177
4.3.4	SR モータ	180
4.3.5	モータの出力	182
4.4	電磁弁	184
4.4.1	電磁弁の動作特性	184
4.4.2	電磁弁の開閉速度	186
4.5	リアクトル	187
4.5.1	DC-DC コンバータ用リアクトル	188
4.5.2	変圧器 (トランス)	193

## 5. 磁性複合材料：圧粉磁心とボンド磁石

5.1	圧粉磁心とボンド磁石	195
5.2	複合材料の考え方	195
5.3	磁性複合材料：圧粉磁心とボンド磁石	198
5.4	圧粉磁心の長所と短所（特徴），利用分野	199
5.4.1	等方的な特性（3次元磁気回路の利用）	199
5.4.2	高電気抵抗率（高周波化による効率向上・小型化）	201
5.4.3	生産時の歩留りが高い	201
5.4.4	磁歪の低減（磁気騒音の低減）	202
5.4.5	磁束密度および透磁率の低下	202
5.4.6	ヒステリシス損失（保磁力）がバルク材に比べて大きい	203
5.4.7	機械的強度が低い	203
5.4.8	圧粉磁心の利用分野	203
5.5	ボンド磁石の長所と短所（特徴），利用分野	204
5.5.1	磁石特性は，原料磁石粉末より必ず劣る	204
5.5.2	生産時および使用時の形状自由度が高い	204
5.5.3	着磁方向の自由度が高い（等方性ボンド磁石の場合）	205
5.5.4	高電気抵抗率（低渦電流損失）	205
5.5.5	ボンド磁石の利用分野	205

## 6. 圧粉磁心およびボンド磁石の作製方法と特性

6.1	はじめに	208
6.2	圧粉磁心用磁性粉末	210
6.2.1	粉末作製プロセス	210
6.2.2	圧粉磁心用磁性粉末の種類と特徴	213
6.3	圧粉磁心用絶縁被膜の種類と特徴	218
6.3.1	リン酸塩系被膜	219
6.3.2	アルカリ土類（希土類）-ホウリン酸塩被膜	221

6.3.3	SiO <sub>2</sub> 系, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系および MgO 系被膜	221
6.3.4	フェライト被膜	224
6.3.5	その他の酸化物系被膜および複合絶縁被膜	226
6.4	圧粉磁心とボンド磁石用バインダ (結合剤)	227
6.4.1	樹脂・高分子系バインダ	227
6.4.2	無機バインダ	234
6.5	圧粉磁心とボンド磁石の作製プロセス	234
6.5.1	粒度調製と混合	234
6.5.2	成形	235
6.5.3	熱処理	245
6.5.4	加工	247
6.5.5	後処理	249
6.5.6	着磁	250
6.6	圧粉磁心の基本特性	250
6.6.1	飽和磁化および高磁場での磁束密度	251
6.6.2	透磁率および低磁場での磁束密度	251
6.6.3	保磁力	253
6.6.4	損失	255
6.6.5	機械的特性	259
6.6.6	耐食性	260
6.7	報告されている圧粉磁心の特性	261
6.7.1	純鉄粉末系	262
6.7.2	鉄合金粉末系	276
6.7.3	アモルファス合金・ナノ結晶材料・金属ガラス系	283
6.7.4	異方性圧粉磁心	286
6.8	市販されている圧粉磁心の特性	288
6.8.1	ヘガネスジャパン	289
6.8.2	神戸製鋼所	290
6.8.3	昭和電工マテリアルズ (旧日立粉末冶金)	291
6.8.4	大同特殊鋼	292
6.8.5	住友電気工業	292
6.8.6	ダイヤモンド	293



6.8.7	エプソンアトミックス	294
6.8.8	アルプスアルパイン	294
6.8.9	そ の 他	295
6.9	ボンド磁石の基本特性	295
6.9.1	磁 気 特 性	296
6.9.2	電 気 抵 抗 率	298
6.9.3	機 械 的 強 度	299
6.9.4	耐 食 性	299
6.10	市販されているボンド磁石の特性	300
6.10.1	ボンド磁石の生産概況	300
6.10.2	マグネトプランバイト (M) 型フェライト系	301
6.10.3	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B 系	302
6.10.4	Sm-Fe-N 系 (Sm <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> N <sub>3</sub> および SmFe <sub>7</sub> N)	307
6.10.5	混 合 系	310

## 7. 圧粉磁心とボンド磁石の応用

7.1	磁気応用部品・機器から圧粉磁心とボンド磁石に求められる特性	312
7.2	圧粉磁心を使用したリアクトル	312
7.2.1	直流送電システム用アノードリアクトル	313
7.2.2	HV用DC-DCコンバータ用リアクトル	315
7.2.3	ガソリンエンジン点火用コイル	319
7.2.4	高スイッチング周波数DDコン用リアクトル	323
7.3	圧粉磁心を使用したモータ	324
7.3.1	自動車ABS用モータ	326
7.3.2	自動車駆動用モータ	328
7.3.3	その他の圧粉磁心を使用したモータ	342
7.4	圧粉磁心を使用した電磁弁：ディーゼルエンジン用コモンレールシステム	345
7.4.1	ディーゼルエンジン用コモンレールシステムの概要	345
7.4.2	電磁弁を使用したコモンレール式噴射弁	347
7.4.3	圧粉磁心を使用した噴射弁の開発	349

7.5	ボンド磁石を使用したモータ	351
7.5.1	電動アクスル	351
7.5.2	インバータ冷却用電動ウォーターポンプ	352
7.5.3	電動シート用モータ	355
7.5.4	その他のボンド磁石を使用したモータ	356

## 付 録

A.1	重要な定数と物性値, および磁気関係の換算式	359
A.2	金属の電子伝導度	360
A.3	規則-不規則転移	361
A.4	アモルファスとガラス	362
A.5	焼 結	363
A.6	液 相 焼 結	366
A.7	コイルの巻数とモータ駆動電流, 電圧の設定	368
A.8	金属表面の酸化挙動	369

引用・参考文献	374
---------	-----

索 引	402
-----	-----

# 5 磁性複合材料：圧粉磁心と ボンド磁石


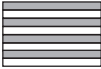




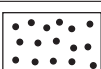
## 5.1 圧粉磁心とボンド磁石

ここから、本書の主題である「圧粉磁心」や「ボンド磁石」の概要について説明する。具体的なプロセスや特性は次章で、応用例は7章で述べる。本章では、まずこれらの材料の特徴（長所と短所）を理解していただきたい。なお、圧粉磁心やボンド磁石は、他の材料と比べても、材料特性・作製プロセス・応用に密接な相互関係がある。わずかな設計仕様の変更で、同じ特性の材料が使えたり、使えなかったりする場合もある。部分的な理解では、これらの材料の全体を把握することは難しい。本章から7章へ読み進めることで、これらの材料の全体像を理解できるように記述している。理解を助けるため、参照する章や節を記しているのので、必要に応じて読み返していただきたい。

## 5.2 複合材料の考え方

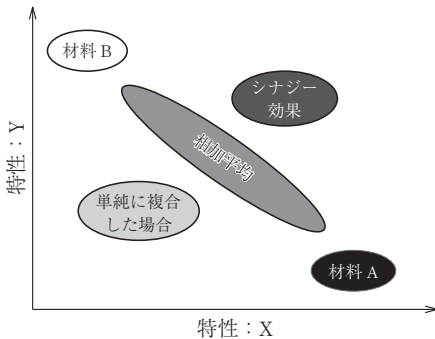
圧粉磁心とボンド磁石は、複合材料なので、まず複合材料について考える。複合材料の定義は、最も広義では「二つ以上の違った材料を、組み合わせて合成することで得られる材料」である<sup>1)</sup>。その概要を表5.1に示す。材料の実用化のためには、多くの場合、突出した特性値ではなく、まんべんなくいろいろな特性が合格点でなくてはならない。一つの相だけでは、このような材料の作製は難しく、そのため複合材料が使われている。

表 5.1 複合材料の組織、形態、効果、用途の概要<sup>1)</sup>

	模式図	複合形態	作用・効果	用途
①		クラッド, 接合被覆	保護, 相補, 補強	バイメタル, 塗装鋼板
②		ラミネート, 積層接合	強化, 方向性改善	合板, ケイ素鋼板
③		ファイバー, 連続複合	強化, 異方性	FRP
④		ファイバー, 不連続複合	強化, 異方性	FRP
⑤		ファイバー, チョップ, 混合	強化, 等方性	複合ウイスカ
⑥		混合焼結, 複合組織	強化, 特性改善	サーメット, 圧粉磁心, 焼結体
⑦		微粒性分散・析出	強化, 耐熱, 特性改善	酸化物分散強化合金, ナノ結晶材料

ところで、しばしば、学会や論文では、複合材料は従来材料よりはるかに高性能を有する材料のごとく論じられるが、必ずしもそれは事実ではない。複合材料では、「シナジー効果（相乗効果）」という言葉をよく耳にする。「シナジー効果」とは、複合した場合に相加平均より高い特性を発現することである。「シナジー効果」は、学術的には重要であるが、発生すれば幸運と考えるべきである。

図 5.1 に、複合材料の特性の概念図を示す。現実には、シナジー効果を発揮する複合材料はほとんどない。それどころか、単純に複合しただけでは、各原料の特性の平均値にさえない例が多い。なぜなら複合することで、特性自体が劣化してしまうためである。第 2 相の量が数 % 程度の場合でも、複合材料の特性値が数桁低下する場合がある。このような複合材料の特性に関して、理論的な解析も行われている<sup>1), 2)</sup>。



「シナジー効果」と「相加平均」特性の関係を示している。単純に材料Aと材料Bを複合しただけでは、「相加平均」特性も示さないことがある。

図5.1 複合材料の特性の概要図

多くの実用化された複合材料の特性は、相加平均的な特性を示すが、これはいろいろな研究や開発の結果である。相加平均特性を発現させるだけでも、高度な研究や技術開発が必要であることを忘れてはならない。筆者は、「シナジー効果」という言葉に惑わされてはいけないと考えている。

本書の題材である「圧粉磁心」と「ボンド磁石」を考えてみよう。この二つの複合材料は、これから説明するように、特性だけ見れば、高性能化しているわけではなく（シナジー効果はない）、特性自体は原材料の平均的な値である。しかしながら、この二つの材料が有する特性は、まさにいままでなかった領域を埋めているのであり、用途上、期待されていた材料であった。そのため、実用化されているのである。

実用材料にとって重要なことは

- ・ 必要なタイミングで供給される
- ・ 必要な特性を有している
- ・ 必要なコストで生産できる

ことである。一つひとつの特性は高くないが、いままでなかった領域の特性を有する材料（筆者は、これこそが、「高性能材料」と考える）は、新規応用を生み出す可能性が高い。まさに、「圧粉磁心」と「ボンド磁石」が、その代表である。

加えて、一つの特性だけがむやみに高い材料が開発されても、最終製品に

は、そこまでの材料特性が必要でないことがしばしばある。結局、最終製品は、いろいろな材料や部品で構成されており、それらの組合せで動作するのだから、一つだけ高性能の場合、宝の持ち腐れ状態になる。実用化を目指すような研究の場合、このような点に十分注意を払う必要がある。

### 5.3 磁性複合材料：圧粉磁心とボンド磁石

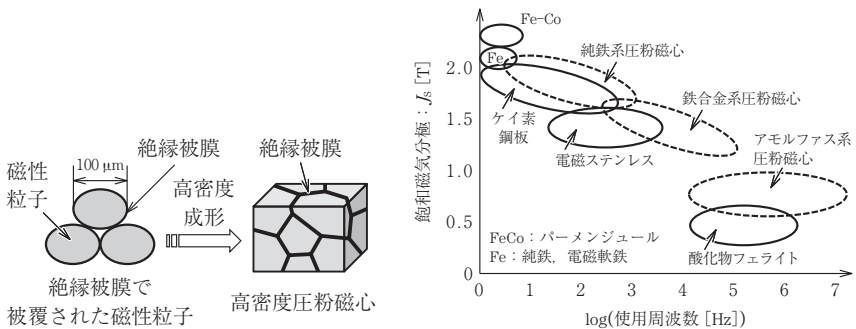
ここで、本書の主題である圧粉磁心とボンド磁石について考える。本書では、これらの材料を以下のように定義する。

・ **圧粉磁心**

表面に絶縁被膜を被覆した軟質磁性粉末を成形してバルク化した軟質磁性材料。バインダが添加されている場合もある。図 5.2 に、圧粉磁心の概要とその特性領域を示す。

・ **ボンド磁石**

磁石粉末に樹脂などのバインダを添加して、成形してバルク化した永久



(a) 圧粉磁心の概要を説明した模式図

(b) 各種軟質磁性材料の飽和磁気分極と使用周波数の関係

使用周波数は、主として電気抵抗率で決まる。圧粉磁心の期待される特性領域は破線で示している。

図 5.2 圧粉磁心とボンド磁石

磁石材料。永久磁石なので、必ず着磁<sup>†</sup>してから使用される。見かけの微細構造は圧粉磁心と同じで、ボンド磁石の場合、図(a)の磁性粒子が磁石粒子、絶縁被膜がバインダで構成されている。

本章の初めに述べたように、この二つの材料はやみくもに高性能化を狙った材料ではなく、単独材料では得られない特性領域（圧粉磁心の場合は図参照）を狙った材料である。特殊な状態やシナジー効果は必ずしも必要とせず、その特性は一般的な複合則で理解できる。次節で両者の特徴を見てみよう。

## 5.4 圧粉磁心の長所と短所（特徴）、利用分野

本節では、圧粉磁心の特徴を説明するが、ある特徴は、長所にも短所にもなり得ることに注意してほしい。

### 5.4.1 等方的な特性（3次元磁気回路の利用）

圧粉磁心は粉末を3次的（無配向）に成形して作製されたバルク体のため、等方的な磁気特性を有する。加えて、電気抵抗率が高いので、その状態（バルク状）のままで使用できる（渦電流損失の影響が少ないため）。つまり、バルクで使用することができ、結果として、磁気回路が3次的に設計できる。この3次元磁気回路の使用が圧粉磁心最大のメリットである。このメリットを説明したのが、図5.3と図5.4である。

図5.3のような円柱状のコイルの場合を考える。このとき、コイルの中は当然円筒形であるので、磁心は円柱状が最適である。図5.3(a)の圧粉磁心のようなバルク材であれば、円柱の製造は容易である。また、断面が円形なので、巻線も特に問題ない。一方、ケイ素鋼板の場合は、図5.3(b)のように板材を積層する。このとき、断面が正方形（長方形）であると、巻線時に無駄な体積

---

<sup>†</sup> 磁化を持たない磁石材料に、磁化が飽和するまで十分な外部磁場を印加すること。外部磁場を取り去っても、磁石材料には磁化が残った状態となり、磁石材料としての使用が可能となる。

# 索引

<b>【あ】</b>		インピーダンス	158	外部酸化法	224, 278
アキシヤルギャップ型		<b>【う】</b>		ガウスの法則	14
モータ	330	ウォータポンプモータ	352	化学的接着説	227
圧延鋼板	96	渦電流損失	80, 90, 256	角運動量	26
圧環強度	149	埋込磁石型	176	角型性	77
圧粉磁心	195	上向きスピンの	39	拡散還元法	307
アトマイズ法	210	<b>【え】</b>		核生成型	73, 124, 130
アノードリアクトル	314	永久磁石材料	121	角速度	157
アモルファス	362	エイチバー	27	カー効果	136
アモルファス化元素	114	液相焼結	366	かご形ロータ	178
アモルファス合金	44, 111, 283	エチレン・アクリル酸		かじり	237
アラゴの円板	177	エチル共重合体	233	ガスアトマイズ法	210
アルカリ土類-ホウリン酸		エプスタイン試験	141	化成処理	219
塩被膜	221	エポキシ	231	硬 さ	147
アルコキシド	271	エリンガム図	369	価電子帯	38, 42
アルコキシド系	223	エルステッドの発見	14	価電子濃度	116
アルニコ磁石	122	塩基解離定数	229	可動コア	184
安息角	146	エンジニアリングプラス		金型圧縮成形法	235
アンペールの法則	15	チック	232	金型潤滑温間成形法	238
<b>【い】</b>		<b>【お】</b>		金型潤滑法	237
異常渦電流損失	83, 258	押出成形法	244	可変界磁トロイダル巻	
位 相	157	オフ時間	188	モータ	339
井上ルール	116	オン時間	188	ガラス	362
異方性 Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	303	温度依存性	87	ガラス転移温度	111
異方性 Sm <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> N <sub>3</sub>	307	<b>【か】</b>		ガラス転移点	362
異方性圧粉磁心	286	界 磁	166	カルボニル鉄粉末	212
異方性磁場	57, 121	開磁路測定	161	カレンダロール成形法	244
インクジェット	245	回転子	169	<b>【き】</b>	
インダクタ	312	外部酸化	370	機械的強度	149
インダクタンス	153, 158			起磁力	153, 167
				規則相	362



規則-不規則転移	361
軌道角運動量	27
軌道角運動量の消滅	30
軌道・スピ角運動量相互作用	61
希土類磁石	126
希土類-ホウリン酸塩被膜	221
逆起電力	153, 172
逆磁区	73
逆スピネル	119
ギャップ	164
キャピテーションエラー	
ジョン	350
キュア処理	247
キュリー温度	33, 90, 121
キュリー型常磁性	31, 46
キュリーの法則	31
キュリー・ワイスの法則	36
強磁性体	25, 49
強磁性体アモルファス	111
凝集エネルギー密度	230
極異方性	353
局在化	36
禁制帯	38
金属ガラス	115, 283
<b>【く】</b>	
空心コイル	152
クローティースモータ	342
クロム酸塩-有機樹脂系混合被膜	105
クーロンの法則	13
<b>【け】</b>	
形状磁気異方性	57
形状磁気異方性磁場	57
形状磁気異方性定数	58
ケイ素鋼板	98
継鉄	163

頸部成長	365
結晶磁気異方性磁場	57
結晶磁気異方性定数	90, 121
結晶粒径	95, 144
ケルビンクリップ	149
ケルビンの式	365
検出コイル	139
<b>【こ】</b>	
コア損失	78
コアレスモータ	170, 356
コイル	151
交換エネルギー	32
交換ステイフネス定数	65
交換積分	65
交換相互作用	32
硬質磁性材料	89, 121
高電圧直流送電	314
交流磁気測定装置	141
コギングトルク	171, 356
固定子	169
固定バンド模型	43
コミュテータ	169
コモンレールシステム	345
<b>【さ】</b>	
最大エネルギー積	77, 121
最大磁化率	52
最大透磁率	54, 90
サイリスタバルブ	314
酸・塩基相互作用の理論	229
酸解離定数	229
残留磁化	53, 121
残留磁気分極	121
残留磁束密度	54, 121
残留磁束密度促進効果	130
残留損失	83

<b>【し】</b>	
磁荷	13
磁化	10
磁界	11
磁化曲線	10, 45, 52
磁化困難軸	60
磁化容易軸	60
磁化率	30, 52
磁気異方性	57
—のエネルギー密度	66
磁気異方性磁場	71
磁気異方性定数	69
磁気エネルギー	155
磁気回路	153, 154
磁気角運動比	28
磁気共鳴周波数	286
磁気随伴エネルギー	155
磁気弾性エネルギー	59
磁気抵抗	154
磁氣的ギャップ	164
磁気分極	10
磁気モーメント	26, 27
磁極の極対数	175
磁気量子数	29
磁区	63
自己インダクタンス	153
磁性ステンレス	110
磁束	13
磁束密度	10
磁束密度分布	142
下向きスピン	39
実効値	157
実効透磁率	286
時定数	159
死点	170
シナジー効果	196
磁場	10, 11, 13
磁場中成形	241
磁場中配向	240

自発磁化 31, 33  
 磁壁 64  
 磁壁厚さ 65  
 磁壁形成エネルギー 66  
 射出成形法 242  
 集中巻き 176  
 主量子数 28  
 ジュール損 78  
 潤滑剤 237  
 純鉄 91  
 純鉄粉末 213  
 焼結 215, 363  
 常磁性体 30, 46  
 状態密度 37, 41  
 初磁化曲線 55  
 初磁化率 52  
 初透磁率 54, 90  
 シリカナノシート 273  
 シリコン 270  
 シリコン系 221  
 磁力線 13  
 磁路長 152, 164  
 磁歪 58, 85  
 磁歪磁気異方性 58  
 磁歪磁気異方性磁場 57  
 磁歪定数 59, 85, 90, 143  
 真空の磁化率 52  
 真空の透磁率 11, 14  
 真空の誘電率 14  
 浸ケイ処理 102  
 振動試料型磁力計 134  
 真の保磁力 53

## 【す】

スイッチング周波数 188  
 スタインメツツの実験式 78  
 ステータ 169, 184  
 ステータコイル 176  
 ストリーナー-ウォルフアス  
 モデル 70

ストリーナー条件 40  
 スピネル系フェライト 118  
 スピノーダル分解 122  
 スピン角運動量 28  
 スピン量子数 29  
 すべり 179  
 スレーター-ポーリング曲線 44

## 【せ】

正弦波 157  
 正孔 41  
 静磁エネルギー 63  
 正スピネル 119  
 整流子 169  
 絶縁体 209  
 絶縁被膜 104, 218  
 接着機構 227  
 全角運動量 28  
 占積率 103  
 センダスト 106  
 センダスト組成 107

## 【そ】

相当径 144  
 塑性変形 87  
 ソレノイドコイル 15, 17, 151

## 【た】

代表径 145  
 多相交流による回転磁界 177  
 単磁荷 10  
 単磁区粒子 69  
 単磁区理論 113  
 探針法 142  
 ターン数 151  
 弾性エネルギー 58  
 タンデル 286  
 単電荷 10

単板磁気特性試験 141  
 タンマン温度 246  
 単ロール法 112

## 【ち】

着磁 199, 250  
 着磁可能な多磁区粒子 73  
 超硬 366  
 超交換相互作用 49, 124  
 超常磁性 46  
 直流自記磁束計 138  
 直流モータ 169

## 【つ】

通電研削加工 248  
 通流率 188

## 【て】

低温減磁 88, 124  
 低融点ガラス 234, 280  
 鉄鋼 91  
 鉄合金粉末 215  
 鉄鋼系磁石材料 122  
 鉄高合金 215  
 鉄鋼材 96  
 鉄酸化物 116  
 鉄心型電磁石 136  
 鉄損 78, 90, 257  
 鉄低合金 215  
 デッドスペース 200  
 電荷 13  
 電解鉄 92, 214  
 点火用コイル 319  
 電気抵抗率 90, 148  
 電気鉄板 98  
 電気伝導率 148  
 電気力線 13  
 電磁鋼板 98  
 電磁軟鉄 94  
 電磁弁 184  
 電子密度 360

電磁誘導	18
電子ルール	116
電 束	13
電動アクスル	351
伝導帯	38, 41
電 場	13
電流容量	191

**【と】**

等価回路	172
透磁率	52
透磁率	90
銅 損	78, 155
等電位点	229
等方性 Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	302
等方性 Sm-Fe-N	309
トランス	193
トルク	156
トルクリップル	171, 356
トロイダルコア	139
トロイダルコイル	152

**【な】**

内部酸化	247, 370
内部潤滑法	237
ナノ結晶材料	111, 283
ナノコンポジット磁石	132
ナノシート法	224
軟質磁性材料	89

**【ぬ】**

濡れの理論	229
-------	-----

**【ね】**

ネオジム磁石	129
熱間加工法	306
ネッキング	365
熱処理	245
熱暴走	107
ネール温度	48

**【は】**

配位数	33
配向度	76, 296
バインダ	227
パウリ型常磁性	39, 46
パウリの排他律	29
銅	91
バックヨーク	163
バッチ焼鈍	103
場の概念	11
パーマロイ	109
パーミアンス係数	162
ハム音	58
パーメンジュール	108
パラファイラ巻き	140
バルクハウゼン効果	69
バルクハウゼンノイズ	55, 68
パルス励磁型 B-H トレーサ	141
反強磁性体	48
半硬質磁性材料	89
反磁界	159
反磁界係数	160
反磁性体	47
反磁場	57
反磁場係数	63
バンド構造	36

**【ひ】**

ビオ・サバールの法則	15
ヒステリシス曲線	53
ヒステリシス損失	78, 90, 255
ひずみ取り	246
ビッカース硬さ	148
比透磁率	52
比誘電率	14
表皮効果	84
表皮深さ	84, 143

表面磁石型	175
ビルディングファクタ	85
疲労強度	260
ピンニング型	75, 129
ピンニング効果	68, 96

**【ふ】**

ファラデーの電磁誘導の法則	18
フェライト系ステンレス	111
フェライトめっき	273, 282
フェライトめっき法	226
フェリ磁性	118
フェリ磁性体	49
フェルミエネルギー	37
フェルミ温度	37, 39
フェルミ準位	37
フェルミ速度	361
フェルミ分布	36, 37
フェルミ粒子	25, 36
フェロ磁性体	49
フォルステライト	105
不規則相	362
複合材料	195
副格子	48
複合被膜	274
複素数平面	158
不対電子	46
歩留り	202
ブラシ	169
ブラシレス直流モータ	174
プラズマ回転電極法	211
フラックスバリア	176
フリンジング磁束	168
篩 径	145
フレミングの左手の法則	24
フレミングの右手の法則	24
ブロッホ磁壁	64

噴射弁 345  
 フント則 29  
 分布巻き 176  
 粉末 209

## 【へ】

平均自由行程 360  
 ヘルムホルツコイル型  
 電磁石 136  
 変圧器 193  
 変形しないバンドのモデル 43

遍歴電子 36

## 【ほ】

ボーア磁子 27  
 方位量子数 29  
 方向性 103  
 飽和磁化 11, 31, 52, 90  
 飽和磁気分極 11, 90, 121  
 飽和磁歪定数 90  
 補償温度 51  
 保磁力 53, 90, 121  
 保磁力機構 73  
 ホブキンソン効果 56, 69, 93

ポリアミド 232  
 ポリイミド 232  
 ポリフェニレンスル  
 ファイド 232  
 ポリプロピレン 233  
 ボルタの電池 12  
 ボルツマン定数 30  
 ホールフローメータ 147  
 ボンド磁石 195, 295

## 【ま】

マイクロピッカーズ硬さ 101

マイナーループ 55  
 巻数 151  
 マグネトプランバイト型 123  
 マックスウェル応力 24  
 マックスウェルの方程式 19

## 【み】

右ねじの法則 14  
 水アトマイズ法 210

## 【む】

無機バインダ 234  
 無方向性ケイ素鋼板 103

## 【め】

メジャーループ 55

## 【も】

モータの効率 173  
 モータの出力 182  
 モータの損失 173  
 漏れ磁束 168

## 【や】

ヤングの式 229  
 ヤング率 58

## 【ゆ】

有効磁界 160  
 有効常磁性ボーア磁子数 31  
 誘導性リアクタンス 158  
 誘導モータ 177

## 【よ】

溶解度パラメータ 230  
 ヨーク 163

## 【ら】

ラジアルギャップ型モータ 331  
 ラトラ試験 149  
 ラトラ値 149  
 ランジュバン関数 34  
 ランダウの反磁性 48  
 ランダウの  $g$  因子 28

## 【り】

リアクトル 187, 312  
 リコイル特性 79  
 粒径 144  
 粒子 209  
 粒子形状 147  
 流動性 146  
 粒度調製 234  
 粒度分布 144  
 リラクタンストルク 25, 176  
 臨界粒子径 71  
 リン酸塩系被膜 219

## 【れ】

励磁コイル 139  
 レマネンスエンハンス  
 メント効果 72, 130

## 【ろ】

ロータ 169

## 【わ】

ワイスの分子場 32, 33  
 ワイスの分子場係数 33

<b>[A]</b>		<b>[K]</b>		SmCo <sub>5</sub>	128
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 系被膜	221	Kronmüller の式	63	SmFe <sub>7</sub> N	131, 307
AlN	280	KS 鋼	122	SPM 型	175
<b>[B]</b>		<b>[M]</b>		SR モータ	180
B-H アナライザ	141	MgO	272	SWAP 法	212
B-H 曲線	52	MgO 系被膜	221, 223	S-W モデル	70
B-H ループトレーサ	138	M-H 曲線	52	<b>[T]</b>	
BLDC モータ	174	MK 鋼	122	tan δ	286
B コイル法	142	Mn-Al-C	133	<b>[U]</b>	
<b>[D]</b>		Mn-Zn フェライト	119	UI 型コア	318
DC-DC コンバータ	188	MQP	302	<b>[V]</b>	
DD コン	188	M 型	123	VFToM	339
<b>[F]</b>		M 積分方式	138	VSM	134
Fe-3.5Si	101	<b>[N]</b>		<b>[W]</b>	
Fe-6.5Si	102	NANOMET	114	W 型	123
Fe-Al	105	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	129	W 型フェライト磁石	125
Fe-Al-Si	106	Nd リッチ相	130	<b>[Y]</b>	
Fe-Co	108	<b>[O]</b>		YASA モータ	341
Fe-Cr	110	OP 磁石	124	<b>[数字]</b>	
Fe-Cr-Co 系磁石	123	<b>[P]</b>		3D-APT	146
Fe-Ni	109	Pt-Co	133	3D プリンタ	245
FINEMET	114	Pt-Fe	133	3点曲げ強度	149
<b>[H]</b>		PWM	335	<b>[ギリシャ文字]</b>	
HDDR 法	304	<b>[S]</b>		α-γ 転移	103
HV 用 DC-DC コンバータ	315	Scherrer の式	146	γ ループ	103
<b>[I]</b>		SiO <sub>2</sub> 系被膜	221	ε-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	123
IPM 型	176	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	128		
		Sm <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> N <sub>3</sub>	131, 307		

**小林 久理眞** (こばやし くりま)

1977年 早稲田大学理工学部資源工学科卒業  
1979年 早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了(金属・資源工学専攻)  
1982年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了(材料科学専攻), 工学博士  
1982年 旭化成工業株式会社(現 旭化成株式会社)勤務  
1984年 フランス政府給費留学生として CNRS 固体化学研究所(ボルドー)留学(1986年3月まで)  
1993年 旭化成工業株式会社退職  
1993年 Trinity College of Dublin(アイルランド)研究員(1995年3月まで)  
1995年 CNRS ルイ・ネール研究所(フランス)客員研究員(1996年3月まで)  
1996年 静岡理工科大学助教  
2005年 静岡理工科大学教授  
2021年 静岡理工科大学名誉教授  
2022年 立命館大学総合科学技術研究機構客員研究員  
現在に至る

**田島 伸** (たじま しん)

1986年 名古屋大学工学部応用化学科卒業  
1988年 名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了(応用化学専攻)  
1991年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了(応用化学専攻), 博士(工学)  
1991年 株式会社豊田中央研究所勤務  
現在に至る

**磁性複合材料—圧粉磁心とボンド磁石—**

Magnetic Composite—Magnetic Powder Core and Bonded Magnet—

© Kurima Kobayashi, Shin Tajima 2023

2023年3月20日 初版第1刷発行



検印省略

監修者 小林 久理眞  
編者 株式会社 豊田中央研究所  
著者 田島 伸  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来 真也  
印刷所 新日本印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社  
CORONA PUBLISHING CO., LTD.  
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00986-6 C3054 Printed in Japan

(森)



©COPY <出版者著作権管理機構委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@copy.or.jp)の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。