

鉄は地球上で3つしかない
「磁石につく物質元素」の1つ

電磁鋼板は鉄鋼材料であると同時に、磁氣的性質を持つ「磁性材料」だ。では磁性材料とは何か。材料が磁性を持つためには「磁石につく性質（強磁性）」が不可欠だが、地球上に存在する物質の中で、常温での強磁性体元素は「鉄」「ニッケル」「コバルト」の3つしかない。工業的に使用される磁性材料は、合金や酸化物の形態でこの3元素のいずれかを含んでいる場合がほとんどである。

電気があるところには磁力が発生する。例えば、鉄の周りに銅線を巻きそこに電気を流すと、磁力が及ぶ空間（磁界）が生まれる。強磁性体元素は、そのときに自らが磁石になる（磁化する）性質を持つ。鉄は、構造材料でありながら強い磁性を併せ持つ貴重な素材だ。

磁性材料には、電流の向きを反転すると容易に磁化も反転する「軟質磁性材料」と、電流の向きを反転しても磁化を維持し続け永久磁石になる「硬質磁性材料」の2種類がある。電磁鋼板は軟質磁性材料にあたる（図1）。

2種類の磁性材料が
ペアで使われる工業製品

では、軟質磁性材料と硬質磁性材料の性質および用途はどのように違うのか。

磁石になる程度を表す「磁化」は、外部から「磁界」を加えていくと強まる。この磁化と磁界の関係を表したものが

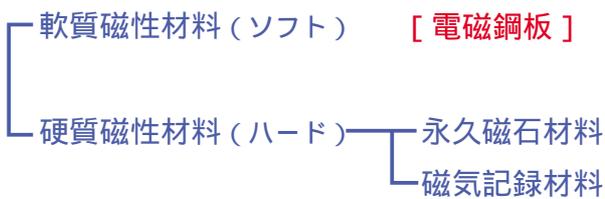
電磁鋼板

磁性材料としての“鉄”の 特性を最大限に引き出す(上)

電磁鋼板とは、磁石につく鉄の特性（磁性）を活かした“機能材料”だ。発電所の発電機、電気を各家庭に送るための変圧器、電気機器のモーターの鉄心として欠かせない。“良い電磁鋼板”とは、電流が流れることで生まれた磁気をスッと通す、エネルギーロス（鉄損）が少ないものだ。八幡製鉄所では、同鋼板の生産を開始した1924年以降この鉄損の低減に挑み続け、現在では、著しい省エネルギーを実現している。本シリーズでは2回にわたり、磁性材料としての電磁鋼板の特性、結晶方位のコントロールを中心とする技術的挑戦、今後の展望を紹介する。

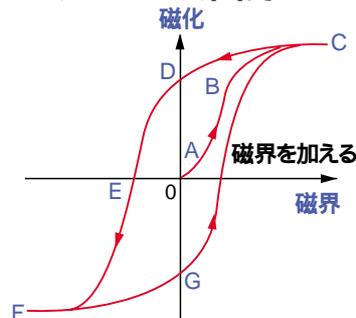
磁性材料

図1



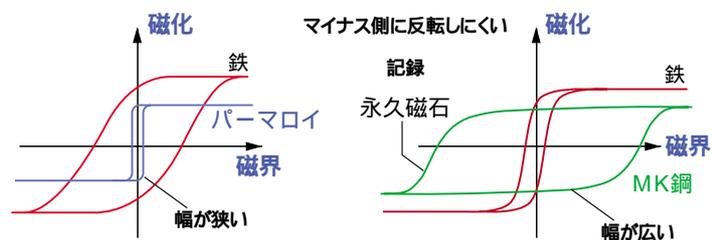
ヒステリシス曲線

図2



磁石になる程度を表す「磁化」は、外部から「磁界」を加えていくと強まる。この磁化と磁界の関係を表したものがヒステリシス曲線。

鉄とパーマロイ 鉄と永久磁石(MK鋼) 図3



軟質磁性材料「パーマロイ(鉄21.5%・ニッケル78.5%)」のループの幅は非常に狭い。ヒステリシス曲線の立ち上がり早く磁気を通過させやすい(高透磁率)特性を持つ。

硬質磁性材料「永久磁石」のループ幅は広い。磁化しにくい、一度磁化させてしまうと強い磁力を持続させる。



が「ヒステリシス曲線」だ(図2)。

磁性材料に磁界をかけていくと、図2のようにA、Bを辿った後はC、D、E、F、Gの軌道を繰り返し磁化ループを描く。例えば、50Hzの関東圏の商用周波数は、磁界の強さが変化し電流の向きが1秒間に50回変化する交流だが、このループが1秒間に50回描かれる。

代表的な軟質磁性材料「パーマロイ(鉄21.5%とニッケル78.5%の合金)」のヒステリシス曲線は、ループの幅が非常に狭い(図3左)。外部からの磁界に反応しやすく、その向きが反転するとすぐに自身の磁化も反転する。つまり、ヒステリシス曲線の立ち上がりが高く磁気を通させやすい(高透磁率)特性を持つ。

一方、硬質磁性材料である「永久磁石」のヒステリシス曲線のループ幅は広い(図3右)。磁化しにくい、一度磁化させてしまうと強い磁力を持ち続けるため、外部からの磁界がゼロになった後、マイナス側に相当量の電気を流さない限り反転しない。

電気製品など一般の工業製品では、この2種類がペアで使われるケースが多い。例えばAV機器などの磁気記録では、記録する磁気テープが硬質磁性材料で、その信号を検知する磁気ヘッドは軟質磁性材料だ。磁気テープは記録後、信号が変化しないよう保護するために硬質(磁性粉など)で、それをスキャンする磁気ヘッド(パーマロイなど)は、信号を敏感に高速で読み取る必要があるため軟質が使われる(図4)。

また、回転するローターと静止しているステーターで構成されるモーターでは、軟質磁性材料である電磁鋼板がステーターに使用され、ローターには硬質磁性材料である永

久磁石が使われる場合も多い(図5)。このように“変わりにくい性質”と“変わりやすい性質”がペアとなり機能を生み出している。

物質の中で最も磁化が大きい鉄

次に、鉄をはじめとする強磁性体が自ら磁石になっていく原理を、ミクロの世界で見てみよう。

物質は原子(原子核と電子)の集合体で、原子核一つ一つの周りをいくつかの電子が回っている。その回転に対して、右ネジが進む方向に磁石としての力の源である「磁気モーメント(磁化の担い手=磁束密度に通じる)」が発生する(右ネジの法則)(図6)。

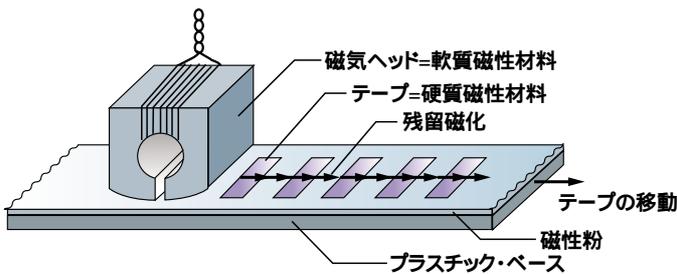
電子は交互に逆向きに回転する性質を持つが、その結果、磁気モーメントの方向も右ネジの法則通り上下に反転し電子対となる。電子がすべて電子対となっている場合は、上下の磁気モーメントが同じ数になり磁気が相殺され、むしろ磁化しようとするのを妨げるように逆向きの磁気モーメントが生じ、磁石につかない(反磁性体)。また不対電子がある場合は、磁気モーメントによる磁気が残り、自らが磁石になるほど強くはないが弱いながら磁石につく性質を持つ(常磁性体)(図7)。

一方、強磁性体は磁気モーメントの間に交換作用が働き、磁気モーメントの向きが揃う。そして物質全体として巨大な磁気モーメントを発生させる(図7)。そのため、磁界を加えていくと、その方向に巨大な磁気モーメントが揃い強力な磁石の性能を発揮し、もちろん磁石につく。

鉄は、強磁性体3元素の中で最も強い優れた磁気モーメ

磁気記録のメカニズム

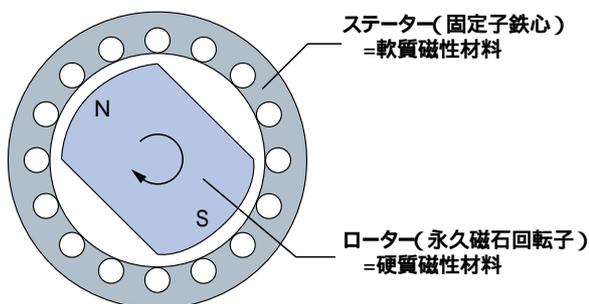
図4



磁気ヘッド(パーマロイなど)は、信号を敏感に高速で読み取る必要があるため軟質磁性材料が使われる。

モーターのメカニズム

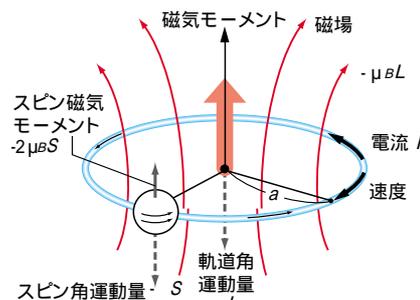
図5



モーターでは、軟質磁性材料である電磁鋼板がステーターに使用され、ローターには硬質磁性材料である永久磁石が使われる場合が多い。

磁化発生のおくみ

図6



電子の軌道、スピンの角運動量、磁気モーメントの模式図

右ネジの法則：
物質は原子の集合体。原子核一つ一つの周りの電子の回転に対し、右ネジが進む方向に「磁気モーメント(磁化の担い手=磁束密度に通じる)」が発生する。

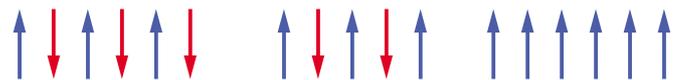
磁気モーメントの違い

図7

反磁性体
(不対電子なし)

常磁性体
(不対電子あり)

強磁性体
(交換作用)

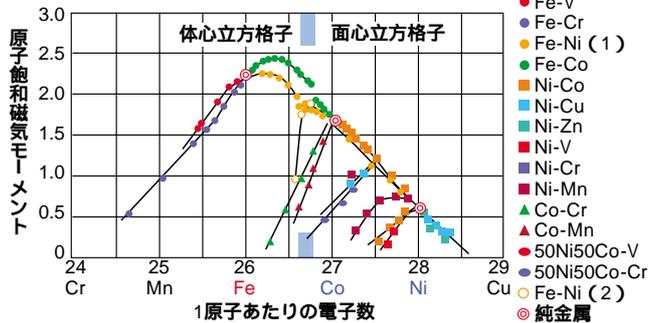


上下の磁気モーメントが同じ数になり磁気が相殺され、磁化しようとするのを妨げるように逆向きの磁気モーメントが生じ、磁石につかない。

自らが磁石になるほど強くはないが弱いながら磁石につく性質を持つ。

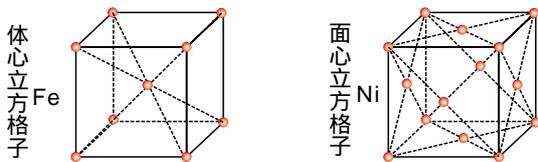
磁界を加えていくと、その方向に巨大な磁気モーメントが揃い強力な磁石の性能を発揮、磁石につく。

スレーター・ポーリング曲線 図8



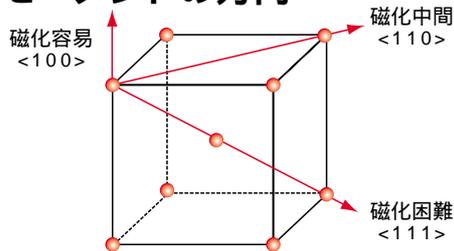
鉄は、強磁性体3元素の中で最も強い優れた磁気モーメントを持つ。

体心立方格子と面心立方格子の違い 図9

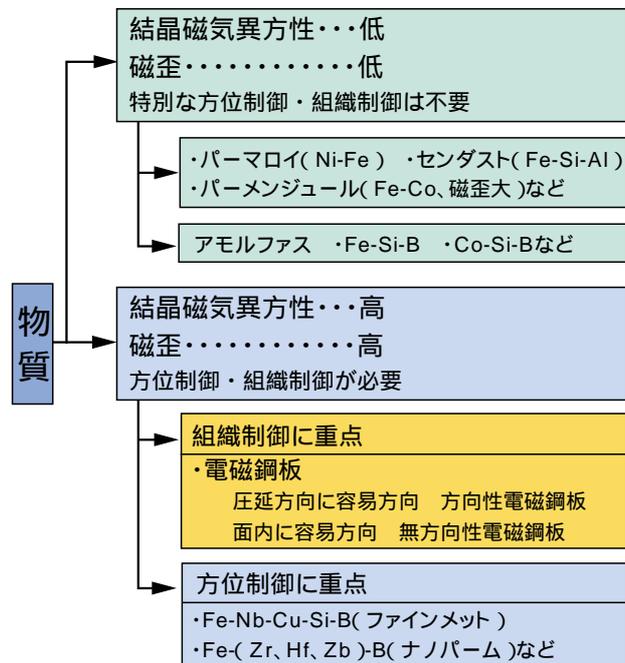


鉄の結晶はサイコロのような立方体で、それぞれの角8カ所と、立方体の真中に1つ原子がある。
ニッケルは、角以外に面の中心部6カ所に原子がある。

鉄の結晶内で生まれる磁気モーメントの方向 図10



軟質磁性材料の分類 図11



ントを持つ(図8)。磁化の強さを表す原子飽和磁気モーメントは、鉄が2.2M_B(ボーア磁子)、コバルト1.7、ニッケル0.6だ。また、鉄にコバルトを添加する(鉄:50%、コバルト:50%)とさらに磁気モーメントが強まる。この合金は「パーメンジュール」と呼ばれ、現在工業製品に使用できる材料の中で最も磁気モーメントが強いが、非常に高価で、現実的に量産して使用できるものではない。

磁性材料の磁気特性を左右する「磁気異方性」

磁気モーメントの動きは、鉄やニッケルの結晶構造の違いが影響している。鉄の結晶はサイコロのような立方体で、それぞれの角8カ所と、立方体の真中に1つ原子がある「体心立方格子」だ。一方ニッケルは、角以外に面の中心部6カ所に原子がある(面心立方格子)(図9)。

結晶中で磁気モーメントは何もなければある特定の方向を向いている。鉄の場合だと立方体の稜線の方向 100 方向だ。鉄では 100 方向に磁気モーメントが向くときに最もエネルギーが低い。外部から加えた磁界が 100 方向であれば磁気モーメントの向きを変えずに簡単に磁気を通す。しかし、111 方向に磁化させようとするとき 100 方向を向いている磁気モーメントを回転させなければならないため、エネルギーが必要となる。一方、面心立方格子のニッケルは 111 方向に磁気モーメントが向くときに最もエネルギーが低いため、111 方向に磁気を通しやすく、100 方向が最もロスが大きい(図10)。

理想的な軟質磁性材料とは、「磁気異方性(方向によって磁化のしやすさが異なる性質)」がゼロの材料だ。その材料はどの方向から磁界をかけてもすぐにその方向に反応し自らが磁石となる。その代表格が「パーマロイ」「パーメンジュール」だ(図11)。パーマロイは鉄-ニッケル合金で、磁気異方性エネルギーがなくなり 100 方向、111 方向等によらず磁化しやすくなる。

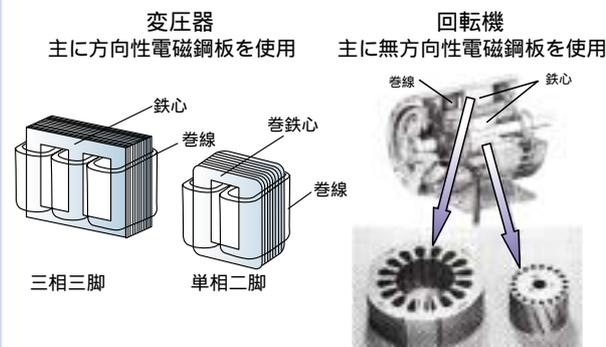
例えば磁気ヘッドでは、どちら向きに磁気テープの磁気モーメントが向いていても、瞬時に感知して信号を拾うことができる。これが本来の軟質磁性材料だ。近年磁性材料として活用分野を広げている「アモルファス」は、結晶構造を持たない非晶質で磁気異方性がゼロのため、軟質磁性材料として優れた特性を持つ。

鉄の磁気特性を活かした高機能材料 電磁鋼板

電磁鋼板はトランス(変圧器)やモーターなどの電気機器の鉄心として不可欠な材料だ。トランスでは電気エネルギーを電気エネルギーに、モーターでは電気エネルギーを機械エネルギー(回転力)に変換する役割を担う(図12)。電磁鋼板は磁界の向きによって磁気の通りやすさが異なる磁気異方性の特徴を逆に活用した高機能材料で、例えば、鉄心として電磁鋼板をフープ状に巻いたトランスでは、フ

トランスとモーターのエネルギー変換原理

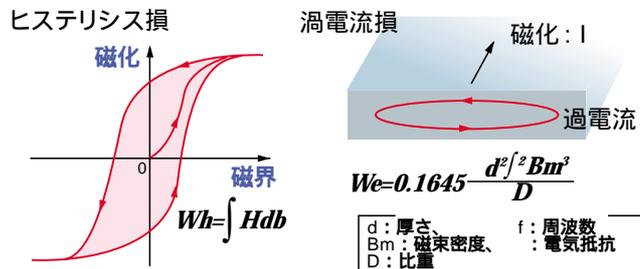
図12



電気エネルギー → 電気エネルギー ← 電気エネルギー ↔ 機械エネルギー

ヒステリシス損と渦電流鉄損

図14

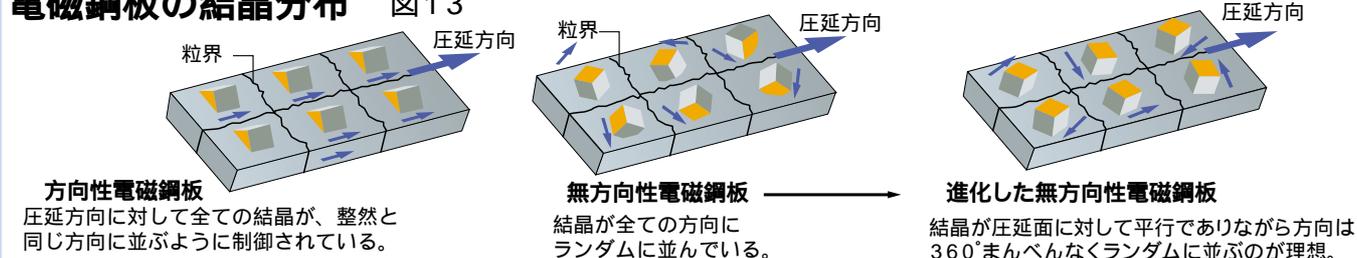


結晶方位を揃えれば揃えるほど減少する。結晶方位を全て100方向に揃えることは工業的には難しいが、新日鉄の高精度な結晶方位制御による方向性電磁鋼板は高く評価されている。

磁界の向きを変えると、磁化の変化を妨げるように鋼板内に生じる渦電流のエネルギーロス。なくすためには板厚内の渦電流が流れ難くすることがポイント。

電磁鋼板の結晶分布

図13



ープの長手方向だけに磁気を通しやすい性質を持たせれば良い。それが圧延方向に100方向の磁気モーメントを揃えた「方向性電磁鋼板」だ。

また、回転により磁界の向きが常に変化するモーターの鉄心には、100方向を鋼板面にできるだけ平均的に配し、さまざまな方向に磁化しやすくさせることが望ましい。「無方向性電磁鋼板」はこの視点から100方向に着目して結晶方位をコントロールする(図13)。

もともと磁気異性がないパーマロイやパーメンジュールに比べ、コスト面やハンドリング性等をも含めたさまざまな観点から、鉄は、この分野で最も機能性、実用性の高い工業材料だ。

電磁鋼板開発の第1の技術的ポイントは「結晶方位制御」にある。磁化させようとする方向に結晶の向きを制御する技術だ。方向性電磁鋼板は、立方体の稜線100方向をできるだけ一直線に揃えると、磁化したときに生じる電気エネルギーのロス(鉄損)が少なくなり、エネルギーの変換効率が良くなる。この鉄損には、先述のヒステリシス曲線のループに見られる「ヒステリシス損」と、交流電流における磁化反転の際にそれを抗するように生じる「渦電流損」の2種類がある(図14)。

ヒステリシス損は、結晶方位を揃えれば揃えるほど減少する。極端に言うと、全て磁気モーメントが100方向を向いている状態で100方向に磁界をかければ、鋼中に不純物や歪みがない状態であれば、ヒステリシス曲線のループは1本の線となりロスがゼロになる。それは結晶方位を全て100方向に揃えることを意味するが工業的には難しい。しかし新日鉄の方向性電磁鋼板は、20tコイルという工業生

産規模で結晶方位誤差が3度程度と、高精度の結晶方位制御を可能にしている。

また、磁界の向きを変えると磁化の変化を妨げるように鋼板内に渦電流が生じる性質を持つ。そのエネルギーロスが、「渦電流損」だ。それをなくすためには板厚内の渦電流が流れ難くする、つまり製品の板厚を薄くする(薄手化)ことがポイントだ。例えば、板厚を半分にすると渦電流損は4分の1になり、薄くすればするほど高い効果が得られる。

さらに、シリコンやアルミを入れて電気抵抗を高め、渦電流損を流れ難くする方法もある。しかし、シリコンを添加し過ぎると、本来の磁気モーメントが小さくなる等の悪影響を及ぼすため、結晶方位制御を緻密に行い実質的性能を補完するなど、求められる特性に応じてそのバランスを高度にコントロールしている。

電磁鋼板の技術開発では、このように結晶方位を緻密に制御することをはじめ、鋼の高純度化、板厚、電気抵抗、磁区構造(次号)等々を通じ、エネルギー変換装置素子として使用するときのエネルギー損失すなわち鉄損を極限まで低減することが求められる。

監修 技術開発本部鉄鋼研究所
鋼材第一研究部 主幹研究員
久保田 猛 (くぼた・たけし)

プロフィール
1952年生まれ。大阪府出身。
1977年入社。
基礎研究所(現先端技術研究所)で厚板関連研究を経て、
1981年より電磁鋼関連研究に従事し、現職。
1983年~1984年に慶應義塾大学物理学科(近角教授)に国内留学。

