

身近な金属の
マイクロ組織を読む
第・回

72

身近な磁石

シリーズ 材料の素顔に迫る

はじめに

前報(68号、2010年7月)では、磁石の種類、磁場と電流との相互作用およびその応用製品としてモーターやスピーカーなどを紹介した。今回は「磁場と電子の相互作用」を中心に紹介したい。

磁場と電子の相互作用

磁場の中に置いた導線に電流を流すと導線は力を受けモーターは回転する。またこの力が受ける方向は「フレミングの左手の法則」で表されることは前回説明した。

電流はマイナス電荷を持った電子の流れなので、電流方向(中指)を逆に取れば、電子が受ける力の方向(親指)がわかる。図1のように、下から上へ磁束が流れる磁場中(人差し指)に右から電子が来ると電子は紙面手前方向に曲げられる。この曲げる力は「ローレンツ力」と呼ばれ、その大きさは $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ で表わされる。ここで、 q は荷電粒子の持つ電荷、 v は荷電粒子の速度、 B は磁束密度(磁場の強さ)である。したがって、この磁場が強いと電子は大きく曲げられ、くるくる回って前に進めなくなってしまう。まずは、この磁場と電子の関係を利用した身近な製品を挙げてみよう。

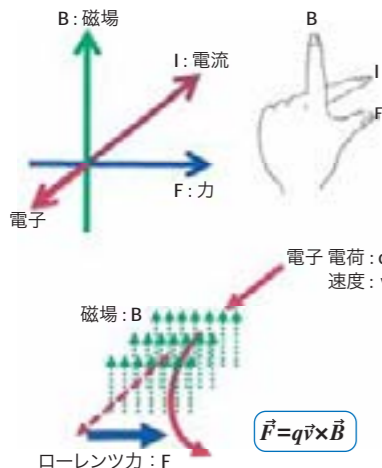


図1 磁場による電子の曲がり(ローレンツ力)
(電子の運動は電流と逆方向である)

磁性応用品事例

1) ブラウン管テレビと電子レンジ

もうかなり減ったが、これまで大変お世話になったのがブラウン管TV。電子は、後方の陰極から放射される前面にあるシャドーマスク(陽極)に向かって進み、その小さな孔を通った電子が蛍光体に当たり発色する(図2)。この陰極の近くには偏向コイル(電磁石)があり、電子線と直交する磁場で電子の進む方向を左右に、また上下に525本走査して1秒間に30コマの画像を造って映像を表示している。

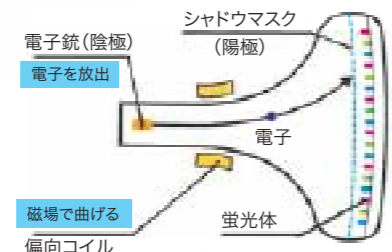


図2 ブラウン管テレビ
(電子は電磁石で曲げられ、
画面を1秒間に30コマ走査する)

電子レンジは相変わらず家庭で活躍している。食品を入れる室の横にはマグネトロンという電磁波発生装置がある(図3)。ここでも、陰極から陽極に向かって電子を出すのが、紙面の上下にあるフェライト磁石の磁場で電子は大きく曲げられ陽極には達することができず、電子は巡回運動して空洞部で共鳴し、2.45GHz(波長12cm)のマイクロ波を発生することになる。このマイクロ波を食品室に導いて食品中の水分子を振動させて摩擦熱で加熱するわけである。このマグネトロンの基本構造は1927年東北大学の岡部金治郎が開発し、レーダー発信機として使われている。

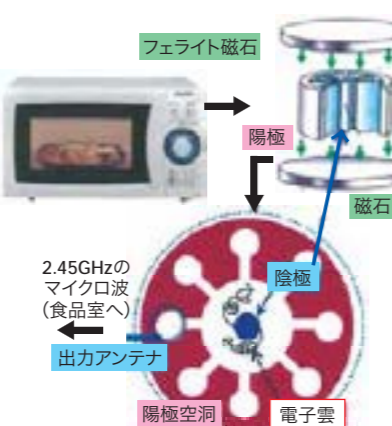


図3 電子レンジのマグネトロン(上から見たところ)
(陰極から出た電子は磁場で曲げられ、空洞で共鳴し、
マイクロ波を出す。)

2) マグネトロンスパッター

液晶パネルや半導体の配線などに使われるスパッタ法は、電極間に高電圧をかけて放電を起こさせ、生じた正イオン(Ar+)を陰極のターゲットに衝突させ原子を飛び出させ対極に成膜させる方法である。この場合も陰極内部(ターゲットの背面)にネオジム磁石を埋め込んで直交する磁場をつくっておくと、正イオンの衝突により陰極から飛び出した(2次)電子は陽極に到達する前に磁場で曲げられ巡回運動する(図4)。この結

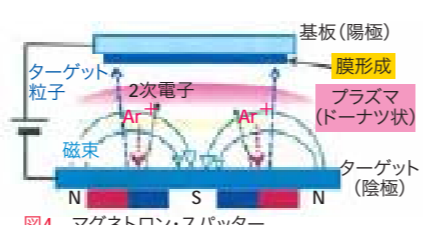


図4 マグネトロン・スパッター
(電子は直交する磁場で曲げられ、ドーナツ状の
高密度プラズマをつくり、電離効率を上げる)

果多くのイオンが電離して、スパッタ膜の生成速度を大幅に上げることができる。

3) 光アイソレーター(ファラデー回転)

レーザー光を発信して対象物を加熱しても反射光が戻ってくれば発信機がやられてしまう。光通信でも発信光が戻ってくればノイズになる。そのため一般に光の発信機にはアイソレーターという戻り光防止装置が付いている。光は真空中では磁場の影響を受けないが、物質中を伝わる光や反射した光は磁場の影響を受ける。これは「磁気光学効果」と言われ、ファラデーが1845年に磁場をかけた鉛ガラスを透過した光で見つけた現象である。

光は一種の電磁波で、進行方向に直交した多数の面に電場の波と磁場の波が交互にできている。自然光にはこの振動面(通常電場を代表する)は多数あるが、偏光子を通った光や表面で反射された光は特定の振動面しか持たない。これを「偏光」と言う(図5)。液晶パネルやその3次元TVにはこの偏光が利用されている。

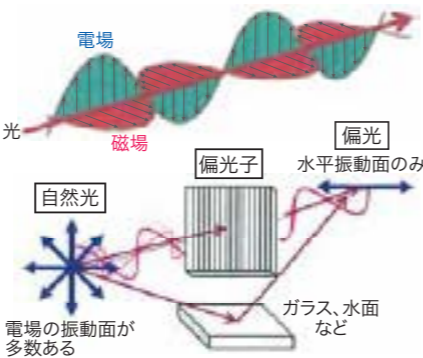


図5 光の振動面と偏光
(光は直交する多くの電場(振動)面と磁場面を
持っている。振動面が限られた光を偏光と呼ぶ。
偏光子の格子は、通常表示と異なり、電場が吸
収されやすい方向を示している。)

また雪山や釣りで使うサングラスも通常の光は通し、雪面や水面で反射された水平偏光(電場の振動面が水平)のみ遮断する仕組みとなっている。

まず発光素子から出た光を偏光子に通して偏光にし、これを光路方向に磁界をかけたファラデー回転子(通常ガーネット単結晶)

磁性応用品Ⅱ

元日立金属 技師長 工学博士 岡本 篤樹

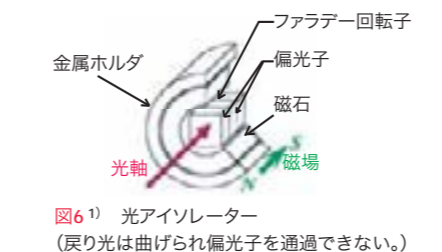
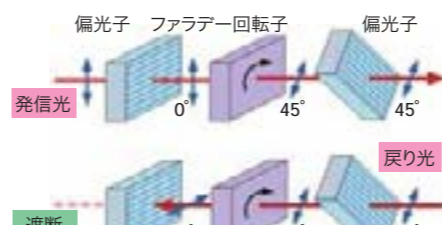


図6¹⁾ 光アイソレーター
(戻り光は曲げられ偏光子を通過できない。)

を通すと偏光角は左回り回転する(図6)。次にその回転角に応じた偏光子を通せば光は進行する。しかし戻り光の場合、偏光子は通すが、ファラデー回転子でさらに同方向に回転するので出口の偏光子を通ることができず、遮断されることになる。

同じような原理で、顕微鏡試料に偏光を当ててその反射光を偏光子に通して見るのがカー効果顕微鏡である(図7)。例えば、磁区構造よりなる試料では、磁区が出す磁場で光の偏光面は回転あるいは強度が変わり磁区コントラストが得られることになる。前報で紹介したネオジム磁石の組織写真はこのカー効果顕微鏡の写真である。一方、ローレンツ電子顕微鏡では、磁区の磁場と電子線の曲がり度で磁区コントラストが付く仕組みになっている。

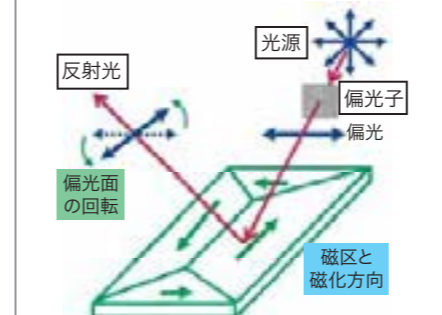


図7 カー効果顕微鏡の原理図
(縦カー効果の例:磁化方向により
偏光面の回転方向が異なる)

放射光発生装置

1) 放射光とは

播磨学園都市にあるSPring-8は、磁場で電子軌道が曲げられる時に出る放射光を利用した理化学研究所の研究施設である(図8)。右上の電子銃から放出された電子は一旦光速に



図8²⁾ 播磨学園都市にある放射光発生施設
(SPring-8とXFEL) (赤矢印は電子の進む方向)

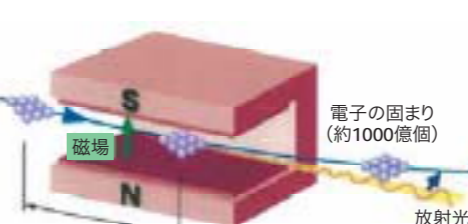


図9³⁾ 偏向磁石からの放射光の発生
(電子は曲げられる時、放射光を出す。)

近い速度に加速され、直径450m、周長1.4kmの大きな蓄積リングに入る。電子は軌道にある電磁石(偏向磁石)の作る下から上への磁場で曲げられ周回軌道となるが、電子軌道が曲げられる時、光子(Photon:質量の無いエネルギー)が振り落とされて「放射光」と言う白色X線が出る(図9)。これを取り出して種々の実験や測定に利用されている。

通常金属の構造解析に使うX線は、ターゲットに電子を当て電子を励起して、電子が基底状態に落ちる時に発生する特性X線、すなわち波長の決まった単色光である。波長と格子間隔dと入射角θの間には、ブラッグの回折条件 $\lambda = 2d \sin \theta$ があるから、反射X線の強め合う位置から格子定数や結晶方位などが分かる。しかし放射光は色んな波長を含んだ輝度の高い白色光(連続X線)である(図10)。

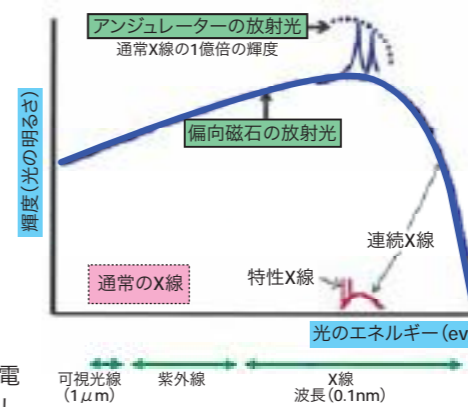


図10 放射光の輝度とエネルギー
(SPring-8の資料⁴⁾を元に作成した模式図)

2) アンジュレーターの構造
アンジュレーターは、電子軌道の上下にネオジム永久磁石を多数配置し、上向きと下向きの強い磁場を交互につくった装置で、蓄積リング直線部の真空内に設置してある(図11)。ここに電子が来ると電子に左向きと右向きのローレンツ力が交互に働き、電子は何回も蛇行する。そして曲げられるたびに、光子が振り落とされ、光子は強め合い非常に強い放射光となる。アンジュレーター光は前記の電磁石(偏向磁石)による放射光より桁違いに明るく、指向性も高く、波長もバンド状になる。また磁石配置を変えることにより、直線偏光から楕円偏光や円偏光が得られ、新しい分光学実験に活躍している。

2011年には、SPring-8の横に別の電子銃を持つX線自由電子レーザー(XFEL:愛称SACLA(さくら)、全長700m)が稼働している。ここにはアンジュレーター(1台あたり5m長、磁石が277周期交互配置)が直線状に配置されている。X線領域(最短波長0.06nm)の強力なレーザー光(位相が揃った光)が得られるので、原子レベルでの瞬時の動き観察や、タンパク質など非結晶材料の構造解析ができるなど期待されている。

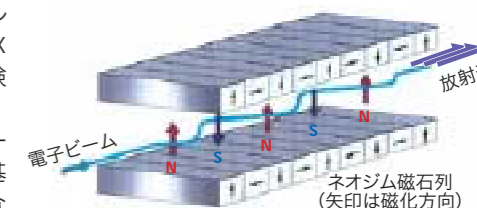


図11⁵⁾ アンジュレーターの磁石配列と磁場
(上向き下向きの磁場で電子は蛇行し、強い放射光を出す。)

おわりに

磁場中に電子がやってくるとローレンツ力を受けて曲げられる。また電子が急激に曲げられるとX線を出す。これらを活用した身近な製品から先端科学を紹介した。また振動面が限られた光(偏光)は磁場でその振動面が回転する。これらを活用した機器を紹介した。

今回は、磁場の変化により起きる電子の運動、すなわち渦電流とその応用について紹介する。

<参考にした図面>

- 1)http://www.smm.co.jp/business/material/product/optical_isolator/
- 2)http://www.riken.go.jp/r-world/info/release/press/2008/080728/detail.html
- 3)http://www.spring8.or.jp/pdf/ja/SP8_news/no1_99/no1_99.pdf
- 4)http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sr/sp8_features/publicfolder_view
- 5)http://www.xfel.spring8.or.jp/cband/j/Undulator.htm

お問い合わせはこちら