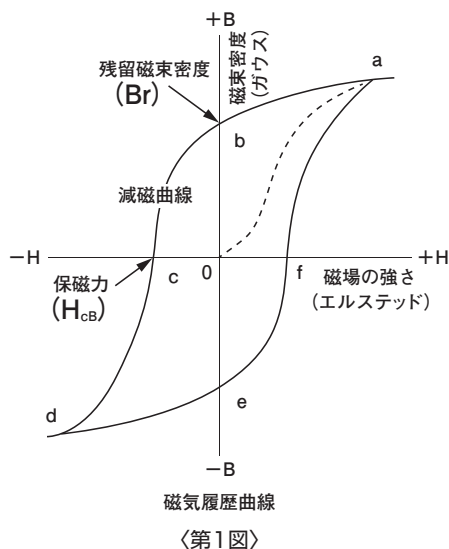


マグネットの基本的な性質

用途に応じた最適なマグネットの設計を実現するためにマグネットの基本的な性質や磁気回路設計の基礎計算式などをご案内しています。より効率のよい設計のための参考資料としてご活用ください。

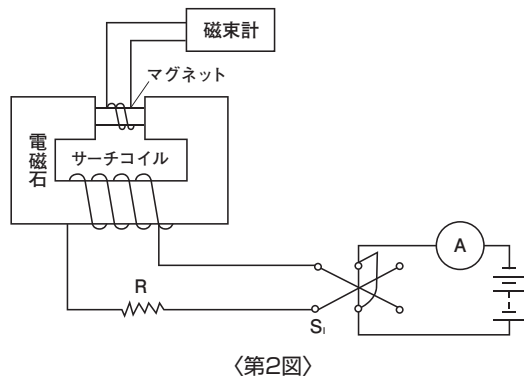
1. 磁気履歴曲線(B・Hカーブ)

第2図のようにコイルの電流を次第に増加させマグネットを磁化させるとマグネットの中の磁束密度もそれにつれて増加し、あるところでついに飽和します。(図中a点)



次にこの飽和状態から電流を減らし磁場の強さを減少させると磁束密度はaから0に戻らずa→bにそって減少します。そして磁場の強さが0になっても磁束密度はbの値だけ残ってしまいます。この値を**残留磁束密度Br**(Remanence)といいます。今度は電流の向きを逆にし、反対方向に磁場を増加させると磁束密度はb点から次第に減少し、ついにc点で0になります。この点での磁場の強さを保磁力または**抗磁力H_{cB}**(Coercive Force)といいます。

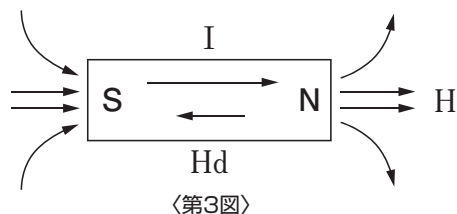
この逆磁場をさらに増して行けばマグネットは逆向きに磁化されてd点で飽和状態となります。このようにして磁場を漸次変化させることによりマグネットの磁束密度はa→b→c→d→e→fと一定のサイクルに従って変化します。このサイクルを磁気履歴曲線(magnetic hysteresis loop)または**B-Hカーブ**といいます。



2. 減磁界の影響(自己減磁作用)

磁化されたマグネットは、第3図に示すように表面に生じる磁場はN極からS極へ向かいますがマグネットの内部では磁化Iの方向とは逆向きにH_dの磁界が働きます。この内部の磁場を減磁界といい、マグネットを減磁させる方向に働くためマグネットを使用する際は常に第1図の磁気履歴曲線の第2象限上で表わされることとなります。この間の曲線部分を**減磁曲線**(Demagnetization Curve)と呼びます。

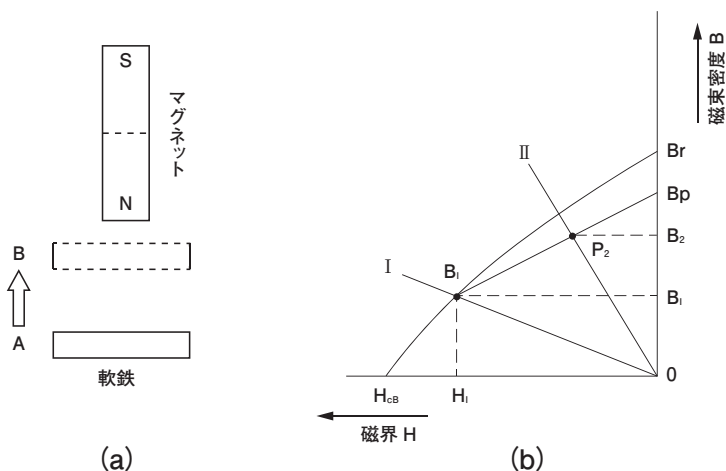
この減磁界はマグネットの寸法比によって異なり磁化方向に細長いマグネットほど小さくなります。この減磁界の影響は実用的には減磁界と磁束密度の比B_d/H_dの傾きで表わされることが多く、このP=B_d/H_dを**パーミアンス係数**((Permeance Coefficient)といいます。そしてパーミアンス係数による直線のことを動作線といい減磁曲線との交点を動作点と呼びます。



動作点に対応した B_d と H_d の積を磁気エネルギー積といい、この値はある動作点で最大値となります。この時の値を**最大エネルギー積 $(BH)_{max}$** と称し、この $(BH)_{max}$ 値がマグネット材料の重要な特性値となります。

3.外部による影響

着磁されたマグネットに軟鉄片を近づけたり外部から磁界が加えられるとマグネットの動作点が移動し、磁力が変化します。



〈第4図〉

a. マグネットに軟鉄片を近づけた場合

第4図(a)のような棒磁石に軟鉄片を近づけるとマグネットの磁力が変化します。これはマグネットによって磁化された軟鉄が外部に磁界を作るため、この磁界はマグネットの磁化を強くする方向に働きます。この動作を減磁曲線上で解析すると軟鉄の位置によってマグネットのパーミアンス係数が変化し、Aの位置でのパーミアンス係数をIとするとBの位置では空隙の長さが減ることによりパーミアンス係数は大きくなりIIへと変化します。この時、動作点は第4図(b)の P_1 から減磁曲線とは別の経路に沿って P_2 点へ達します。この経路 P_1 - B_p は直線で近似することができリコイル線と呼ばれます。この直線の勾配 $\mu r = (B_p - B_1) / H_1$ を**リコイル透磁率**と呼びます。 μr は材料定数で、この勾配は概ね B_r 点における減磁曲線の接線に近い傾きとなりフェライトマグネットでは $\mu r = 1.05 \sim 1.2$ の値を示します。

動作点が P_1 から P_2 へ移動すると磁束密度が B_1 から B_2 へと増加することになります。このように軟鉄等が磁石の近くにあることより磁力が変化しますので磁力の測定・評価方法には注意が必要です。

b. マグネットに逆磁界が加わった場合

着磁されたマグネットに逆向きの外部磁界が加わった場合、磁束密度が変化し減磁することが考えられます。この時の動作も減磁曲線上で解析することができます。B-Hカーブはマグネットに磁界をかけたときの磁束密度の変化を表わしたのですが、この時のBの値は実際にはマグネット自身の磁化の強さにマグネットにかかる外部磁界の強さも含めて表わしたものです。

$$B = \mu_0 H + I \quad \mu_0: \text{真空の透磁率}$$

Cgs単位系ではマグネットの磁化の強さを $4\pi I$ となり

$$B = 4\pi I + H \text{ と表わされます。}$$

この外部磁界の影響を打ち消してマグネット自身の磁化の強さと外部磁界の関係を表わしたものを **$4\pi I$ -Hカーブ**といいます。第5図にB-Hカーブと $4\pi I$ -Hカーブを示します。

B-Hカーブ上の保磁力 H_{cB} は、見かけ上マグネットの磁束密度が0になる磁界の強さで、マグネット自身の磁化の強さ $4\pi I$ が0になる磁界の強さは H_{cJ} といいます。従ってちょうど H_{cJ} の大きさの外部磁界を加えた後、その外部磁界を取り除くとマグネットの残留磁束密度は完全に0になってしまいます。この意味で H_{cJ} を真の保磁力と称します。マグネットに外部磁界による減磁界が作用する場合は、第2象限で描かれるB-Hカーブ上ではなく、 $4\pi I$ -Hカーブ上での解析が必要になります。

第5図において、パーミアンス係数 P_c なる動作点Aから垂線を上げて $4\pi I$ -Hカーブとの交点をBとすれば、B点は外部磁界を除いて自己減磁界の影響だけを受けた時の磁化力を示すこととなります。ここで H_d の減磁界が作用した場合を考えると、減磁界 H_d が作用した時の磁化力は直線OBと平行に引いた動作線と $4\pi I$ -Hカーブとの交点Cで表わされますから、このC点より垂線を下し、B-Hカーブとの交点をDとすればこのD点はマグネットに減磁界 H_d が作用した状態での動作点を表わすこととなります。減磁界 H_d を取り去ると動作点はリコイル線上を移動してパーミアンス係数 P_c との交点Eへ移動しますから、結局マグネットは B_{d1} - B_{d2} 分だけ不可逆な減磁をしたこととなります。

低温でマグネットを使用する際には、B-Hカーブの温度変化によりさらにこの減磁率が大きくなりますから、 H_{cJ} の高い材料を選ぶことと同時にパーミアンス係数をできるだけ高くしてマグネットの設計をされるようおすすめします。

磁気回路の設計

基礎計算式

磁気回路においても、電気回路と同じような回路法則が成り立ちます。

即ち、磁気回路をそれと等価な電気回路に置き換えてオームの法則を適用して考えます。マグネットの起磁力をF、全磁束を Φ_t とし、回路の磁気抵抗(リラクタンス)をRとすれば

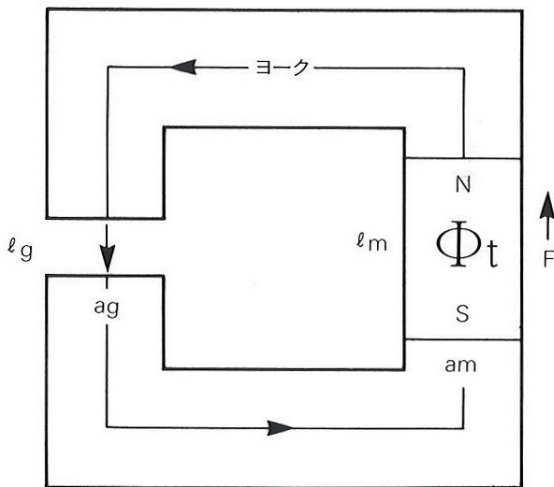
$$\Phi_t = \frac{F}{R} \quad (1)$$

で表わされます。

この磁気抵抗は、回路の空隙長を l_g 、空隙の断面積を a_g とすると

$$R = \frac{l_g}{\mu a_g} \quad (2)$$

となります。 μ は磁路の透磁率で空気の場合は真空の透磁率に等しく、 μ_0 となります。 $(\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)})$



〈第7図〉

電気回路では電流が回路外に漏れることはほとんどありませんが、磁気回路では絶縁部と導体ヨークとの透磁率の差があまり大きくないため実際には磁束の漏洩も大きくなります。この漏れ磁束分は漏洩係数(leakage factor) σ として磁気回路に生ずる全磁束 Φ_t と空隙の有効磁束 Φ_g との比で表わされます。

$$\sigma = \frac{\Phi_t}{\Phi_g} \quad (3)$$

また、磁気回路中の接ぎ目などによる磁束の損失も考慮に入れなければなりません。これは起磁力損失係数(reluctance factor)としてfで表わします。

漏洩係数 σ は空隙面の増加分に相当し、起磁力損失係数fは空隙長の補正係数を意味しますから、修正された磁気抵抗は

$$R_c = \frac{l_g}{\mu a_g} \cdot \frac{f}{\sigma} \quad (4)$$

となります。この磁気抵抗の逆数をパーミアンス:Pと呼び、一般的にはこのパーミアンスを用いて計算を行ないます。①式に代入して

$$\Phi_t = PF \quad P = \frac{\mu a_g}{l_g} \cdot \frac{\sigma}{f} \quad (5)$$

マグネットの断面積を a_m 、長さを l_m とし、マグネット内の減磁界を H_d 磁束密度を B_d とし、マグネット内の磁束密度が一樣であるとすれば

$$F = l_m H_d \quad \Phi_t = a_m B_d \quad (6)$$

と表わされます。⑥式よりパーミアンス係数を求めると

$$P_c = \frac{B_d}{H_d} = \frac{l_m}{a_m} \cdot \frac{\Phi_t}{F} \quad (7)$$

これに⑤式を代入すると

$$P_c = P \frac{l_m}{a_m} = \frac{l_m}{a_m} \cdot \frac{\mu a_g}{l_g} \cdot \frac{\sigma}{f} \quad (8)$$

となります。従ってマグネットから見た外部パーミアンスPをマグネットの単位体積当りに換算したものがパーミアン係数Pcであるともいえます。以上がパーミアンスを決定する基本式となります。起磁力損失係数fは、概ね1.1~1.3の値で通常1.2とすれば大きな誤差はありませんが、漏洩係数σはある程度変動するため、計算により求めなければなりません。⑨式より

$$\sigma = \frac{\Phi_t}{\Phi_g} = \frac{F_t \cdot P_t}{F_g \cdot P_g} \quad (9)$$

ここでFt/Fgは起磁力損失係数に相当しますから

$$\sigma = f \frac{P_t}{P_g} \quad (10)$$

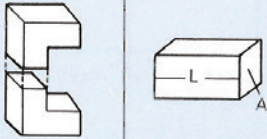
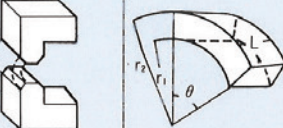
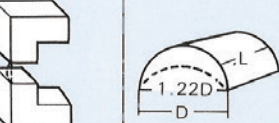
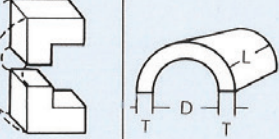
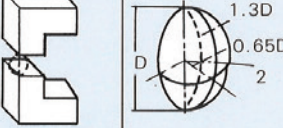
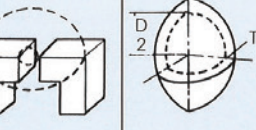
となります。Ptは空隙パーミアンスと漏洩パーミアンスの和となりますから

$$P_t = P_g + P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (11)$$

PgはPg=μag/lgとして容易に算出できますが、漏洩パーミアンスは相当複雑になるため、第8図のようにそれぞれを単純化して算出するのが一般的です。このようにしてそれぞれのパーミアンスを求め、σを算出します。

$$\sigma = f \left(1 + \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_g} \right) \quad (f \approx 1.2) \quad (12)$$

各種空間のパーミアンス

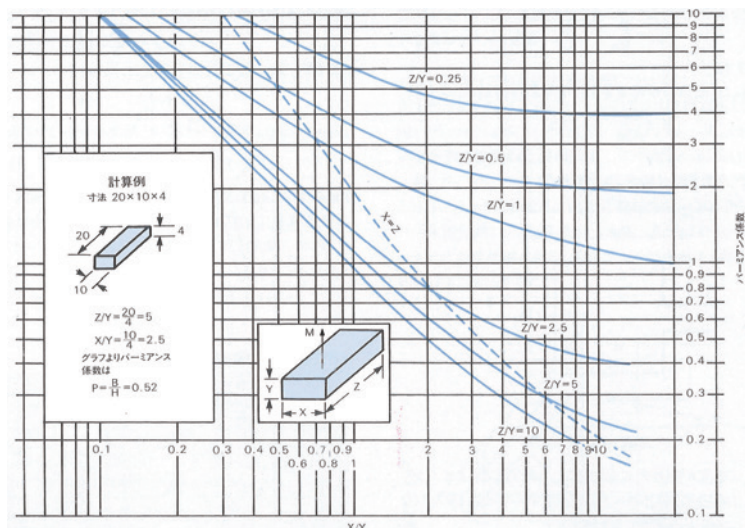
1	平行な平極面間のパーミアンス		$P = \mu \frac{A}{L}$
2	扇形磁路のパーミアンス		$P = \frac{\mu L}{\theta} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$ $= \frac{2.3 \mu L}{\theta \log_{10}} \frac{r_2}{r_1}$
3	半円筒の直径両端間のパーミアンス		$P = 0.264 \mu L$
4	半中空円筒のパーミアンス		$P = 0.64 \frac{\mu L}{\left(\frac{D}{T} + 1\right)}$
5	四半球の直径両端間のパーミアンス		$P = 0.077 \mu D$
6	四半球殻のパーミアンス		$P = \frac{\mu T}{4}$

〈第8図〉

マグネット単体におけるパーミアンス係数

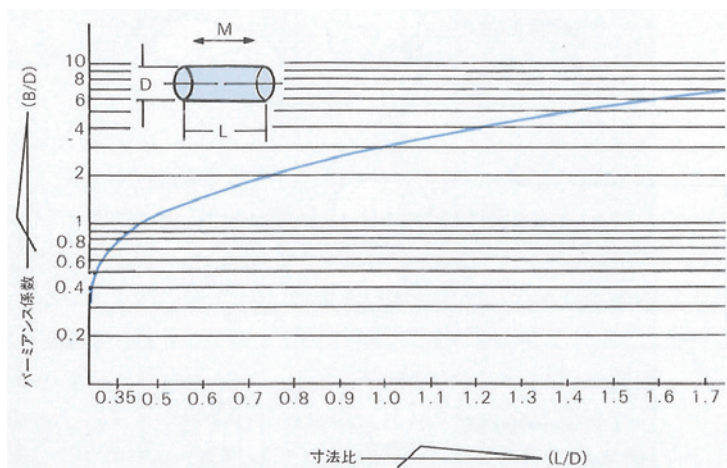
一般にマグネットは極部に鉄板などを付けて使用します。磁性材を取り付けずにマグネット単体で使用する事も稀ではありません。このようなマグネット機器の設計に際しては、第9図～第11図を参考にしてください。

角形磁石のパーミアンス係数と寸法比との関係



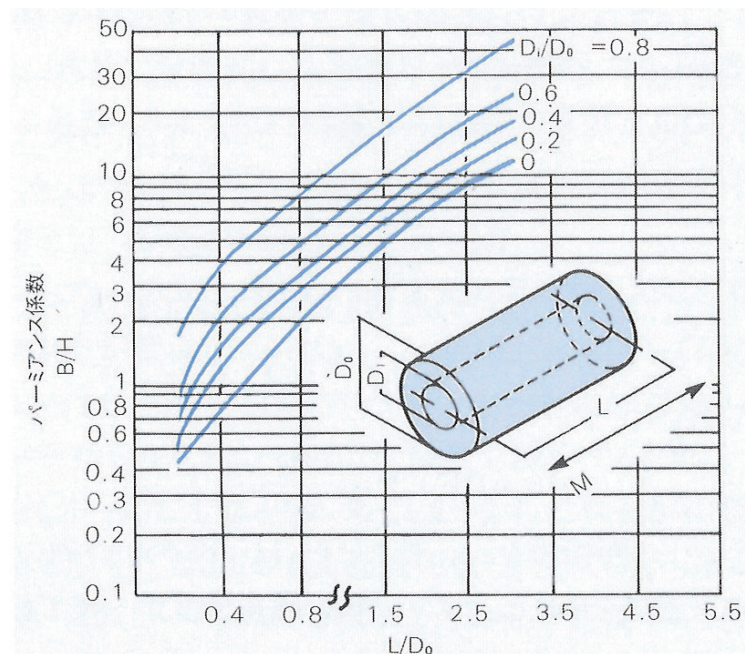
〈第9図〉

円柱形磁石のパーミアンス係数と寸法比(L/D)との関係



〈第10図〉

軸方向磁化の管状磁石のパーミアンス係数(B/H)



〈第11図〉

磁石の使用上のご注意

安全上のご注意

磁石をご使用に当たっては下記の注意事項を十分に留意され安全にお使いください。ご使用方法を間違えると機能を損ない、事故を招く恐れがあります。また本製品を使用する前に必ず製品カタログまたは技術資料等の製品マニュアルをお読みください。

！警告

- ペースメーカーなど電子医療機器を装着した人、およびその他の電子医療機器へ磁石を近づけることは大変危険です。医療機器の正常な作動を損ない、人命にかかわる恐れがあります。
- 磁石を飲み込まないように注意してください。万一飲み込んだ場合は直ちに医師にご相談ください。お子さまの手の届くところには磁石を置かないでください。

！注意

- けがや機能不良を起こさないために、以下の注意事項をお守りください。

1. 各材質の磁石に共通の注意事項

◎ユーザー各位に対する注意事項

設計

- (1)異方性磁石では磁化方向により磁気特性は大きく異なります。設計に当たっては異方性の方向にご注意ください。
- (2)カタログの磁気特性値はご使用時の保証値ではありません。磁石はご使用になる寸法・形状などにより、カタログ通りの磁気特性値が得られない場合があります。事前にサンプルなどをご確認ください。
- (3)磁石は一般的に加熱することにより磁化の大きさが低下します。低下の場合は使用される動作点によっても大きく変わります。温度特性を参照して組立時または使用時に温度が上がりすぎぬよう、また、できるだけ減磁が少なくなるような磁気回路設計を行ってください。
- (4)お客様で磁石の磁化(着磁)をされる場合、材質および保磁力に応じた十分な磁界を与えてください。磁界の強さが不十分な場合、設計通りの磁気特性が得られないことがあります。磁化に必要な磁界の大きさについては弊社にご相談ください。
- (5)磁石の種類(材質)磁気回路によっては組込(組立)後着磁の困難なものがあります。一般的には保磁力の大きいものほど組込着磁は困難となります。
- (6)次のような環境での使用、保管は避けてください。磁石の腐食や特性および強度劣化を引き起こします。耐候性については各磁石の材質によって異なりますので、予め防錆などにつきご相談ください。
 - ①腐食性ガス雰囲気(Cl、NH₃、SO_x、NO_xなど)
 - ②導電性の高い環境(電解質を含む水中など)
 - ③水素雰囲気中
 - ④酸性、アルカリ性、有機溶剤など
 - ⑤水中、油中
- (7)お客様で切断または分割などの加工をされる場合、磁石特性の劣化、着磁不良などが生じることがあります。加工条件については弊社にご相談ください。なお、お客様で加工される場合、加工中や使用中の欠けや割れ発生に対する保証はいたしかねます。
- (8)磁石の材質の多くは硬く、脆い性質を持っています。自動車など振動が加わるような用途に使用される場合はヨークに接着するなど強度を維持するとともに、万一割れても脱落することのないように設計に留意ください。
- (9)磁石と磁石、ヨーク、ポールピースなどとの接合に接着剤を使用する際には、接着剤の種類、量、条件、強度などを十分検討し、信頼性をご確認ください。
- (10)モーターなど高速回転体で磁石が破壊される場合があります。設計に当たっては、万一破壊しても破片が飛散しないような措置を講じてください。
- (11)圧入、焼きばめなどの加工をするときは、磁石の特性が劣化したり、磁石や相手材が割れるなどの恐れがあります。必ず事前にサンプルで確認してください。
- (12)漏洩磁束は他の機器に影響を及ぼす場合がありますので、できるだけ漏洩の少なくなるような磁気回路を設計してください。

組立・取扱い

- (13)磁化された大型磁石は磁石同士または鉄片など磁性体との間に非常に強い吸引力(または磁石間の反発力)が生じます。運搬や組立の際に手などを挟まれたり、吸引力や反発力で身体のバランスを崩し、思わぬ怪我をすることがありますので適切な治具を使用するなど磁石の取扱いには十分注意してください。
- (14)磁石のシャープエッジで手指などの怪我をすることがあります。取扱いに十分注意してください。
- (15)空芯コイルを用いて着磁をする場合は、磁石がコイルから急激に飛び出すことがあり危険です。安全のため、磁石はコイルの中心部に置き、固定してください。
- (16)磁化された磁石を重ねる場合は、磁石が離れにくくなったり、欠けたりすることがあります。その場合には、間にボール紙などをスペーサーとして挟み込んでください。
- (17)切り出し用磁石を加工する時、切り粉が自然発火する恐れがあります。切り粉について下記事項に留意してください。
 - ①火気および可燃物は絶対に近づけないでください。
 - ②電気掃除機は使用しないでください。
 - ③発火した場合に備え、粉末消火器、砂などを用意してください。

- (18)磁石によっては、防錆の目的で表面処理(メッキや塗装)が施されているものがあります。吸着などの外部衝撃でメッキや塗装が剥がれると磁石に錆が発生します。磁石をぶつけたり落としたりしたときはメッキや塗装が剥がれていないことを確認してからご使用ください。またメッキや塗装が剥がれたものは使用しないでください。
- (19)着磁された磁石を鉄板に吸引させたり、また磁石同士を吸引させたり、反発させたりしないでください。減磁することがあります。
- (20)着磁された磁石を交流・直流磁界に近づけると減磁することがあります。
- (21)着磁された磁石は鉄粉などのゴミを吸着しますので、梱包ケースから取り出すときはホコリのない環境で行ってください。
- (22)磁石は、着磁されていない磁石でも微小な磁性体が付着する場合がありますので取扱いに注意してください。また、精密モーターに使用する場合は組み付け後洗浄してから使用してください。
- (23)磁石はそれぞれの材質に特有のキュリー温度があります。キュリー温度近くに加熱すると磁化を失います。組立などで加熱せざるを得ない場合は弊社にご相談ください。
- (24)ヨークなどに接着する場合は、接着後に機械的な歪が残らぬような接着剤および接着方法を選んでください。残留応力がかかったまま使用されますと、わずかの衝撃で磁石が割れることがあります。
- (25)磁石は衝撃に弱く、割れや欠けが発生しやすいので取扱いに注意してください。取扱い中に割れや欠けが発生した場合、特性劣化や強度劣化の恐れがあります。

保管

- (26)磁石は一般にかけやすい材質が多く、取扱いに注意が必要です。衝撃が加わることをしないような場所に保管してください。
- (27)錆の発生を防ぐため雨水などかからぬようご注意ください。
- (28)着磁されている磁石には、着磁されていることを明示のうえ、木箱など非磁性材料でカバーをしてください。

その他

- (29)磁石を近づけると磁気記録媒体の記録が破壊することがあります。フロッピーディスク、磁気カード、磁気テープ、プリペイドカード、切符、ブラウン管などに磁石を近づけないようにしてください。
- (30)磁石を電子機器に近づけると計器盤、制御盤に影響し、故障や事故につながる場合があります。近づけないでください。

◎一般消費者に対する注意事項

- (31)磁石を磁気テープ、フロッピーディスク、プリペイドカード、切符または電子時計に近づけると、磁気記録が破壊されたり、磁化されて使用できなくなることがあります。また、電子キーでカードや切符が使用できなくなることがありますので、電子キーとカードや切符を一緒にポケットに入れたりしないでください。
- (32)磁石を飲み込まないように注意してください。万一飲み込んだ場合には直ちに医師にご相談ください。お子さまの手の届くところに磁石を置かないでください。
- (33)金属に敏感に反応するアレルギー体質の方は、磁石に触れると皮膚が荒れたり、赤くなったりする場合があります。このような症状があらわれた場合には磁石に触れないでください。
- (34)一般の磁石では、磁石の成分が水に溶け出す場合がありますので、磁石に触れた水は絶対に飲まないでください。
- (35)ペースメーカーなど電子医療機器を装着した人へ磁石を近づけることは大変危険です。医療機器の正常な作動を損なう恐れがあります。ご注意ください。
- (36)磁石は一般に割れやすいものです。その破片が目に入ったり、破片で怪我をする場合がありますので、ご注意ください。
- (37)磁石は吸着力が強いため、手を挟まれないようご注意ください。

2. 各種磁石に固有の注意事項

希土類磁石

- (1)使用環境により磁石の表面が酸化することがあり、酸化防止のためにメッキなどの表面処理が必要になります。特にネオジウム系では多くの場合表面処理が必要です。使用条件に合わせた表面処理を施した磁石をご使用ください。
- (2)希土類磁石の合金粉末は消防法で第二類(可燃性固体)第一種の危険物に指定されています。磁石の使用中の摩擦によって生じる微粉末は発火および着火の危険性がありますので、磁石粉末が発生する恐れのある使用は行わないでください。
- (3)希土類磁石の微粉は自然発火の危険性がありますので、お客様で加工される場合は、切り粉や研削粉は空气中に放置せず、必ず水を張った入れ物に保管してください。また、万一の発火に備え砂を用意しておいてください。発火したならば直ちに砂をかぶせて可燃物を遠ざけてください。
- (4)希土類磁石の中でもネオジウム系は、温度上昇に対する磁気特性の低下率が大きいものがありますので、設計に当たって十分ご注意ください。
- (5)ネオジウム系磁石は、液体窒素温度付近以下では磁気特性が低下しますので、設計に当たって十分ご注意ください。
- (6)高温多湿の場所での保管は避けてください。

フェライト磁石

- (1)異方性フェライト磁石など、材質によっては低温で減磁するものがありますので注意が必要です。ご使用になる温度で必ずご確認ください。
- (2)フェライト磁石は電装用などに多用されていますが、特に割れやすい材質であるため、十分な衝撃に耐えるような対策を行ってください。

ボンド磁石(ラバーマグネット/プラスチックマグネット)

- (1)ボンド磁石をある温度以上に加熱すると、減磁、特性劣化、軟化、変形するものがありますので注意が必要です。使用可能温度については、弊社にご相談ください。

- (2)ボンド磁石は、高温だけでなく温度を下げた場合でも脆化減少によって機械的強度が低下することがあります。使用温度を参照して設計を行ってください。
- (3)ボンド磁石は、一般の磁石に比べて強度が弱く、ご使用に当たっては取扱いにご注意ください。
- (4)使用バインダー、塗装などに使用する有機物により腐食性ガスが発生する場合があります。事前に弊社にご相談のうえ、適切な材料を選択してください。
- (5)希土類系ボンド磁石は錆びやすい金属粉末を使用していますので、適切な表面処理(メッキや塗装など)が必要な場合があります。ご使用に当たっては予め弊社にご相談ください。
- (6)ボンド磁石は、使用しているバインダーの種類によっては、吸湿や有機溶剤による膨潤現象によって寸法変化や機械的強度の低下を起すことがあります。予め弊社にご相談ください。
- (7)ボンド磁石を空芯コイルを用いて着磁または脱磁をする場合は、着磁条件によっては磁石が加熱されることがあり、不用意に触ると火傷する恐れがあります。磁石の取扱いにご注意ください。
- (8)ボンド磁石は、製造条件などによっては磁性粉末が脱落する恐れがあり、HDDなどで使用においては深刻な損害を与える危険性があります。防錆上は必要なくても表面処理が施されたものをご使用ください。
- (9)ボンド磁石をヨークなどに接着加工する場合は、樹脂の種類や接着面の状況によって目的の接着強度が得られないことがあります。ご使用になる接着剤で必ずご確認ください。