

特 別 講 演

永久磁石の研究とその問題点*

牧 野 昇**

A REVIEW OF STUDIES ON THE PERMANENT MAGNET

Noboru Makino

Synopsis:

The main subjects for research of permanent magnets were summarized in this lecture. High coercive force of new permanent magnets are to be expected when fine particle have either high crystal anisotropy or anisotropy of particle shape. In this cases the particle consists of single magnetic domain, and any change of magnetization must occur by domain rotation.

The magnetic energy products of permanent magnets are improved by manufacturing methods such as the formations of columnar grains, the treatments in a magnetic field or the cold working.

Fundamental problem in efficient design of permanent magnets is to know the working of of permanent magnet in various applications. Leakage flux is comparable to effective flux. It should be determined the leakage factor to design quantitatively.

It is essential that the magnetic flux should be stable over long periods of time.

External influences such as external magnetic fields, mechanical shock and magnetic shunt affect the magnetic flux of a permanent magnet. Spontaneous redistributions of domain magnetization may take place without any external influences.

I. 結 言

永久磁石の性能がいちじるしく進歩し、その用途の拡大も目覚ましいものがある。本講演においては永久磁石の研究に関する問題を取り上げ、とくに過去において問題のあつた点および将来なお解明を必要とする事項について説明してみよう。まず永久磁石の研究における題目の中で常に変わらない焦点である抗磁力について最近の学説とその実際例について述べ、続いて製造上から試みられた永久磁石に対するいくつかの磁性改良の跡と将来への途を調べてみる。次に永久磁石の設計および応用に関する研究が他の学問分野に比べると立遅れているので、磁気回路の設計と磁性の安定性について新しい論文を解説し、その問題点を探つてみる。

1. 永久磁石研究の歴史

永久磁石の歴史をふりかえつてみると、これを3つの時代に大別することができる。すなわち—

- i 焼入硬化型永久磁石の時代
- ii 析出硬化型永久磁石の時代
- iii 単磁区微粉末永久磁石の時代

第1の焼入硬化型磁石の時代は大正時代から昭和前期

にかけてであつて、この時代は K.S. 鋼をピークとした Cr 鋼, W 鋼などの特殊鋼がその王座をしめていた。この抗磁力はたかだか 230 エルステッドであるが、この磁氣的硬化はマルテンサイトの内部歪と非磁性オーステナイトの分散により磁壁の移動が防げられることによつてえられる。第2の時代は昭和8年の MK 磁石の発明に始まる析出硬化磁石の時代であつて、これに引続いて同じ形式の Alnico, NKS, Cunife, Koster 合金などが相次いで出現した。これは析出物の存在による磁氣的な不均質さが抗磁力を高めるに役立つている。第3の磁石は将来の発展が期待されている微粉末磁石であり、ここ数年これに関する研究に諸外国の研究者の力が注がれている。

永久磁石の進歩の過程を Fig. 1 に示す。年代順に永久磁石の種類と性能を棒グラフに示してある。その進歩の跡は目をみはらせるものがある。

* 昭和 33 年 4 月本会第 55 回講演大会 俵賞授賞記念講演

** 東京計器製造所, 磁鋼製造部 工学博士

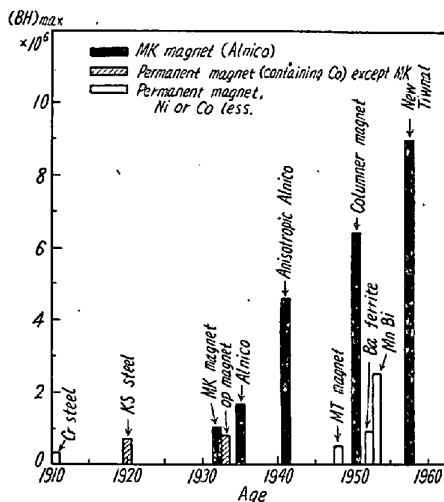


Fig. 1. A history of progress in permanent magnets.

2. 永久磁石の性能

永久磁石は外部に磁場を生ぜしめるのに使用される材料であつて、一定の磁場を与えるのに必要な磁石の寸法の小さいほどその性能は優秀といえる。単位面積当りの磁束 (B) と単位長さ当りの起磁力 (H) をそれぞれ縦軸および横軸とする B—H 曲線が永久磁石の磁気の状態を示すが、永久磁石を論ずる場合は常に減磁場の作用している状態で使用されるので減磁曲線を考えればよい。

永久磁石が外部にたくわえる有効磁気エネルギー

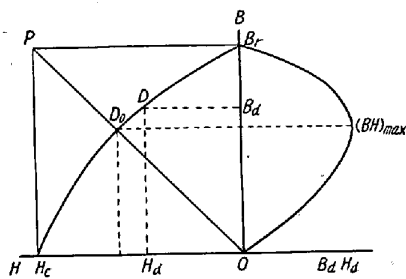


Fig. 2. Demagnetization curve and energy product curve.

はその磁束密度 (Bd) と減磁場の強さ (Hd) の積に比例している。したがつて Fig. 2 に示すように永久磁石の能力を最も有効に発揮しうる

点は (BH)_{max} に対応した動作点に位置している状態である。永久磁石の研究の中心は、その磁性を高めることにあり、いいかえればいかにして (BH)_{max} の値を向上させるかにあるといえよう。永久磁石の性能向上に関する研究はつぎの2つに集約される。

- i 抗磁力を高めること。
- ii 磁氣的異方性を大きくすること。

これについての研究の結果を次章以降においてやや詳しく述べてみよう。

3. 永久磁石の機能

永久磁石がコイルに比べて長所とする点是他からエネルギーの供給を必要とせず、磁場の安定性に優れ、同じ磁気エネルギーを小さな体積でえられることなどが挙げられる。永久磁石が実際に使用されている場合、その機能としては電気エネルギーまたは機械的エネルギーを他のエネルギーに転換するトランスデューサーの役割が挙げられる。たとえば電流計やスピーカーなどは電気的エネルギーを機械的エネルギーに、発電機やマグネトなどは機械的エネルギーを電気的エネルギーに、またチャックや磁気分離機などは機械的エネルギーを別の機械的エネルギーに転換する機能を応用したものである。

永久磁石の応用に関する分野の中で、とくに研究の対象となりまた研究を必要とする事項は次のとおりである。

- i 永久磁石の設計の定量化
- ii 磁束の安定化と経時変化

前者の永久磁石の設計に関してとくに問題となるのは磁気漏洩係数の算出であり、この他に動的な磁気回路の磁気の状態や有効磁気エネルギーを求めることもなかなかむずかしい。後者は長期間の使用中に磁石の磁性が低下するため、精度や性能が劣化するので磁石の使用者にとつて常に考慮を欠くことができない。これらについて第Ⅳ、Ⅴ章に述べてみよう。

II. 抗磁力に関する新しい学説

永久磁石というものは一言にしていえば抗磁力の高い磁性材料ということになるので、まず抗磁力に関する研究が永久磁石の研究の基本的な対称となつている。新しく発達した磁石の中できわめてすぐれた性能をもつ次の3つの磁石についてその抗磁力の機構についての実験結果を検討してみよう。

- i Alnico V 磁石 (異方性 MK 磁石)
- ii Ba フェライトと MnBi 磁石
- iii Pt-Co 磁石

これらの抗磁力はいずれも微粒子説によつて説明され近代の永久磁石は、単磁区の回転が磁気異方性によつて困難となるという現象を利用していることが予想される。

1. Alnico V 磁石

永久磁石における代表的な存在である Alnico V 磁石 (Co 24%, Ni 14%, Al 8%, Cu 3%, Fe 残部) の抗磁力の機構については析出物による内部歪の不均質が磁壁の移動をさまたげるものと考えられていた。その後微粒子説を裏付けるいくつかの実験結果が発表され

た。その中でとくに決定的なものとして次の2つが挙げられる。

- i 電子顕微鏡による析出物粒子の形状の確認
- ii Fe または Fe-Co 微粉末による Alnico V 磁石の磁性の再現。

この磁石は α 固溶体から磁場の中を約 $1^\circ\text{C}/\text{秒}$ の速度で冷却し、続いて 600°C に焼戻すことにより $Br=12,000$ ガウス、抗磁力 600 エルステッド、 $(BH)_{\text{max}}=5.0 \times 10^6$ ガウス・エルステッドの割期的な磁性がえられる。この状態における合金の組織は顕微鏡ではもちろんのこと電子顕微鏡によつてもその析出物の存在を識別することができなかつた。その後 Fahrenbrach (1954) は電子顕微鏡の分解能を高めることによつて数百 \AA の長さをもつ細長い形状の析出物が磁場冷却の磁場方向に長軸を向けて整列していることを認めた。その析出物の寸法は Fe または Fe-Co 合金の粒子の単一磁区臨界寸法と同じ程度であつて、しかも長軸と短軸の比が大きく形状的に強い異方性をもっているので、すぐれた抗磁力をうることが予想される。析出物と地は Fe-Co の rich な相と poor な相に分離しその飽和磁化の強さの差は大きい。これは磁気分析などでたしかめられている。Luborsky など (1957) は実際的に Fe または Fe-Co 合金の細長い微粉末をつくり、これを固めて Alnico V 磁石とほとんど同じ減磁曲線をもつ磁石をつくつている。その粒子の大きさは長さ数百 \AA であつて、Hg 電極に電着させて製造している。

この磁石の抗磁力についてはなお次のような点は検討を必要としよう。

- i 規則格子相 α' の存在とその役割
- ii 固溶体化温度として2つの温度範囲の存在すること。
- iii 時効硬化した後でこれをやや高温に昇温させることによる復元現象の存在。
- iv $(\alpha+\gamma)$ 相の加熱冷却におけるいちじるしいヒステリシス

2. MnBi 磁石と Ba フェライト

Alnico V 磁石のように合金組織の中に臨界寸法のオーダーの微粒子を析出させるのではなく、初めから細かい粉末をつくり、これを適当な非磁性バインダーかまたは単に焼成してかためるという方法が可能となり、これによつてきわめて特徴のあるすぐれた性能をもつ磁石がえられるようになった。これは最近の永久磁石の研究に関する一つの焦点となつている。この理論の基礎的な考え方は磁壁が存在すると磁壁の移動によつて磁区の磁化方

向は容易に変化するのに対し、単一磁区の粒子では磁化方向の変化が回転によつておこるので、材料の磁気異方性が大きいと抗磁力が大きくなるという点にある。

この系列の磁石は始めて粉末磁石を研究した加藤、武井両博士および本多博士のパイオニアとしての役割をわすれることはできない。また理論的方向の進歩には Néel (1947), Kittel (1949), 製造に関しては Guillaud (1943), Went (1952), Mendelsohn (1957) などの功績によるところが大きい。Ba フェライトと MnBi 磁石においてはいずれもその結晶異方性が大きいという点が生かされている。これらの磁石に対して今後の研究課題としてのごさされているものを次に挙げてみよう。これらが解決されれば現在の永久磁石に君臨する位置をしめるようになるのであろう。

- i 所定の粒度形状をもつ均一な微粉末の製造方法。
- ii 粉末処理中における酸化の防止。
- iii 成型プレスと磁場の附加方法。

単一磁区となる粒子の直径は小さく、MnBi, Ba フェライトで数ミクロン、Fe で数百 \AA である。このような微粉末を均一に製造するには高度の技術を必要とする。また当然これらの微粉末は Ba フェライトを除いて極度に酸化しやすく、これに対して原料から完成品にいたるまで完全な管理を必要とする。粉末はそれぞれ容易磁化方向を有しており、これを磁場中でプレスすることにより異方性を与えて磁性向上をはからなければならない。これに対するプレス方法、バインダーの添加など解決を要する点が多い。

3. Pt-Co 磁石

Pt-Co 磁石は永久磁石として理想的な性質をもっている。すなわち磁性があらゆる磁石の中で最もすぐれており $Br=6,000$ ガウス、 $H_c=4,000$ エルステッド、 $(BH)_{\text{max}}=9.0 \times 10^6$ ガウス・エルステッドである上に、ダクティルで切削も可能である。しかし Pt という高価な金属をふくんでいるので、実用になりがたいがこの磁氣的硬化機構を明らかにすることは今後の新しい合金への発展に役立であらう。

この合金は Pt Co の原子比率の組成で、不規則範囲から 750°C で $1000^\circ\text{C}/\text{分}$ の冷却速度で冷却し、 600°C に時効して一部規則格子相が分散した状態において最高の磁性がえられる。抗磁力の大きさは不規則格子の地の中に分散した規則格子相の分布、寸法および形状と関連するのかわ、または相の間の coherency が重要な因子となるか明瞭でないが、しかしこの正方晶格子の高い結晶異方性 (約 10^7 erg/cm^3) に原因していることはうたがう

余地はない。

III. 製造方法による性能向上の研究

永久磁石の性能向上に対しては新しい合金成分を研究する他に、所定の成分をもつ磁石に対してその製造方法を改良することも大きな役割をもっている。次にその中のとくに興味あるものをいくつか取り上げてみよう。

1. 磁場処理

永久磁石に対する磁場処理は2つの場合に適用されている。この処理の1つは磁石を高温から磁場中冷却する方法で、Alnico V, VI, OP 磁石などがこれによつており、他の1つは粉末を磁場の中でプレスする方法で Ba フェライト, MnBi, 微粉末 Fe 磁石などに有効である。磁場処理による磁性の改良を Table 1 に比較して示す。

Table 1. Effect of treatment in a magnetic field.

Materials	Treatment	Magnetic properties		
		Br (G)	Hc (Oe)	(BH) _{max}
Alnico V	No field Cooling in field	8,700	570	2.1×10^6
		12,500	600	5.0×10^6
Ba ferrite	No field Pressing in field	2,000	1,800	0.9×10^6
		3,800	1,900	2.4×10^6

磁石の磁場冷却における有効性の原因についてはなお検討を必要とする点が多い。OP 磁石の磁場処理効果については近角、谷口 (1954) などによる directional order の形成と深い関係があるように思われる。Alnico V の磁場処理効果は析出物の核が生成する際に磁場の方向に顕著な異方性が生じるために生じる。とくに合金磁石で Alnico V のみが有効であるのは Curie 点が高いので強磁性に変化した時の原子の mobility の大きいこと、地と析出物の格子常数の差がわずかなため析出の時に磁場の効果が大きな因子として作用しうることなどが挙げられる。磁場処理による磁性改良の効果はきまはめていちじるしいものである所以他の系列の磁石に対して

もその有効性を再検討する必要がある。

粉末をプレスにて成型する行程中で磁場を加えることは材料に磁気異方性をあたえ磁性がいちじるしく向上する。この場合 Ba フェライト, MnBi 磁石では容易磁化軸 C 軸を磁場の方向に揃え、微粉 Fe 磁石では粒子の長軸の方向をこれに整列させる効果をもっている。

2. 柱状晶組織

Alnico 磁石とくに Alnico V 磁石は鑄造組織が粗大な柱状晶に発達しやすく、しかもその柱状晶の長軸方向がほぼ (100) 軸方向に平行となつていいるため、この方向に測定した磁性はすぐれたものになつていいる。したがつて熔湯が冷却する場合に一方向に Progressive Solidification をするように端面に冷し金をつけることによつて柱状晶結晶をうるることができる。現在この方法でえられる最も優秀な磁石は Phillips (1956) により実験室的にえられた $(BH)_{max} = 11 \times 10^6$ ガウス・エルステッドという素晴らしいものである。従来の異方性 Alnico 磁石と比較すると Table 2 のとおりである。

今後の研究課題としては次の点が取り上げられよう

- i 粗大な柱状晶の生成が可能であるような合金成分と熔解法の研究。
- ii 所定方向に凝固を進行させる鑄造方案と凝固の際に核となる介在物の間隙。

鑄造以外にも冷間加工が可能な磁石、たとえば Cunife Vicalloy などでは冷間加工とこれにともなう焼戻しによつてえられる集合組織をつくることによつて、同じように磁気異方性が生じ磁性を向上しうる。なお塑性加工の可能な磁石の出現は、永久磁石が内部歪に依存しないことを示唆した点で有益であつた。

3. 精密鑄造と焼結磁石

最近のように磁石の性能が向上し、これを使用する機器も精密化され小型化するにしたがつて、永久磁石も小さい複雑な形のものに対する需要が増大してきた。現在のような砂型鑄造では重量 10 g 以下の小型製品またはやや寸法は大きい複雑な形状の磁石をつくるのが困難であつて、精密鑄造法(ロストワックス法)か粉末冶金

Table 2. Effect of columnar grains for magnetic properties.

Materials	Magnetic properties			Chemical composition
	Br (G)	Hc (Oe)	(BH) _{max} × 10 ⁶	
Alnico V	12,200	600	5.0	Co 24, Ni 14, Al 8, Cu 3, Fe Bal
New Ticonal	11,700	1,350	11.0	Ni 14, Co 35, Al 7, Ti 5 Fe Bal

法によつて製造され、わが国でもここ 2, 3 年の間に生産が始められている。諸外国では後者の方法を採用しているところが多いが、両者ともに一長一短があつて、精度および磁性の点では前者がすぐれ、強度および磁性の均一性の点では後者が良好のようである。これらの小型磁石の製造において問題になるのは次の点である。

- i 焼結磁石は粉末の専門メーカーがなく原価的に高価となつていること。
- ii これらの製造方法は型(ダイス)が高価で、これを償却するのに製品の大量受注を必要とすること。

4. 添加元素の影響

添加元素の効果としては磁性の改良が興味をひく点であるが、それについてはふれず製造上に遭遇する障害を除去する効果について述べてみよう。

まず Alnico 磁石の炭素の悪影響を除去するためには、Ti の添加が有効であつて、これにより製造方式の敏感性を抑えることが可能である。また鑄造磁石の研削加工の際の欠けやチップの防止に Zr の添加が役立つ、熱処理の敏感性などに対しては Si が有益である。また Ba フェライトの焼成を促進し、ちみつな組織をうるには Bi, As の添加、OP 磁石に対しては磷酸塩の添加がよい結果をあたえている。今後も研究室における実験でなく、このように現場における製造法についての添加元素の有効性について検討を一層必要とするし、また欠くことのできない研究課題である。

IV. 永久磁石の設計

永久磁石の磁気回路の設計は電気回路に比べて定量的に取扱うことがむずかしい。これは起磁力と磁束の比である磁気抵抗が一定でなく、また磁気漏洩が大きくその状態が掴み難いためである。永久磁石を使用するにあたり、どのような寸法をとるのが所定の磁気エネルギーをうるために経済的であるかを求めることは、使用者にとつてきわめて必要な事項であるが、その設計法に関する報告が少なく、具体的な方法についての説明が希望されていた。この稿では永久磁石の設計法を順序を追つて解説することは省略し、とくに問題となつている 2, 3 の事項についてふれてみよう。

1. 永久磁石の動作状態

永久磁石を設計する場合に最も基礎的な問題は使用される永久磁石の磁気状態を正しく理解することである。永久磁石の特性は B と H を座標軸とする減磁曲線と与えられる。スピーカーや電気計器用の磁石のように磁

気抵抗または磁場が変化せずに磁気状態が減磁曲線上の一点で示されるような静的な磁束をもつ場合の設計は、ほぼ定量的に求めることが可能となつた。

静的磁気回路において磁化したままで使用する場合の永久磁石の動作状態を Fig. 3 に示し、また磁化した後に安定減磁をした場合のそれを Fig. 4 に表わす。後者における減磁は磁石そのものの開路状態を経て再組立した場合をとつた。

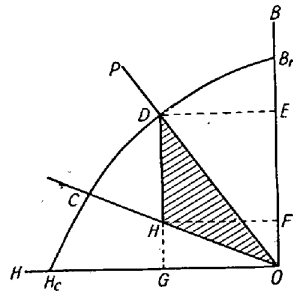


Fig. 3. The working of a permanent magnet producing a static flux.

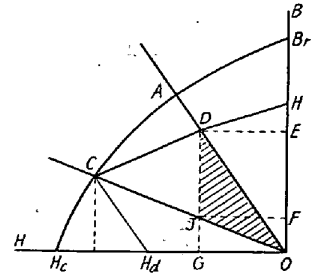


Fig. 4. The working of a permanent magnet producing a static flux with full recoil.

Fig. 3 における OP 線は磁気回路の全パーミアンス係数 (Bd/Ha), OC 線は漏洩回路のパーミアンス係数を示している。動作点 D の有効磁束は DH, 減磁場の強さは OG であるので、有効磁気エネルギーは DHFE で表わされ、これは $\triangle DHO$ の 2 倍にひとしくなるので、この面積を最大になるように設計すればよい。永久磁石の表面漏洩が無視できるとすると、有効磁気エネルギーを最大とすることは、全エネルギー ($DGOE$) を最大とすることにひとしいので A 点を $(BH)_{max}$ の位置に取ればよい。永久磁石の設計には $(BH)_{max}$ 点に対応した磁束密度をもつ寸法をきめれば、経済的な寸法という条件を満足する。これはスピーカー磁石、電気計器用磁石などにいくつかの実例がみられる。

次に減磁場をうけた後に使用される静的磁束をもつ磁石の場合 Fig. 4 に示すように単体磁石の磁気状態 C からリコイル線 CH に沿つてふたたび回路のパーミアンス係数 OA 線に交わる点 D にもどつてくる。動作点 D における有効磁束密度は DJ, 減磁場の強さは OG であるので有効磁気エネルギーは DJFE となり、 $\triangle JOD$ の面積の 2 倍にひとしい。この面積が最大であるには、D 点の位置が CH の中点となるように空隙または漏洩パーミアンス係数をきめてやればよい。これの応用例としてマグネチックチャックや吸引磁石などがあげられる。発電機、マグネト—またはモーターのように動的な磁束

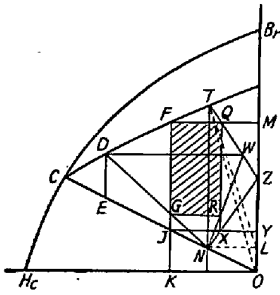


Fig. 5. The working of a permanent magnet in a generator (Desmond)

パーミアンス係数線との交点Cにくる。ふたたび組みこんで最大パーミアンス線の位置にもどすと、リコイル線上をTにもどってくる。

次にこれを高速運転してコイルをショートすると、アーマチュアレクションによって磁石の動作点はDに下る。発電機に有限な負荷のかかった場合、動作点はDとT間のリコイル線上のF点になる。F点における全磁束はFK、有効磁束はFJである。またF点における起磁力はFM、空隙におけるドロップはXY=QMとなる。したがって漏洩磁場と空隙磁場の磁気エネルギーを差しひくと有効磁気エネルギーとしてFJXQがえられ、この中でアーマチュアーの電流の抵抗によって消費されるものを比率αで差しひくと、結局有効磁気エネルギーはFQRGとなる。この面積は菱形TDNWの面積の1/2の時が最大となる。

上記にもとずいて設計をおこなう場合にも仮定をたてて単純化をおこなっている。したがって次の点に注意をはらう必要がある。

- i 磁石の表面から漏洩がおきるので、磁石の各部分はB-H曲線上の一点で動作していないこと。
- ii 空隙線は直線とは考えられないこと。
- iii 磁極の移動を正確に掴むことの困難。
- iv 正確な磁気漏洩の算出の不可能であること。

2. 磁気漏洩

永久磁石の設計において磁気漏洩が最も重要な因子の一つとなつている。永久磁石の用途は磁場を外に取り出すという役割をもつているので回路に空隙が存在している上に、空気と強磁性体の磁気抵抗の差が電気回路のように格段に相違していない。したがって漏洩磁束が有効磁束に比して大きな比率となつている。

永久磁石の断面積(A_m)を求める計算式は次式による。

$$A_m = \frac{A_g \cdot B_g}{B_d} \cdot \sigma$$

をもつ磁石の場合、その設計を定量的におこなうことはむずかしく磁石の動作点の把握も正確におこなわれない。1例としてDesmondによつて求められた発電機における磁石の動作状態をFig. 5に示す。まず着磁して後磁石をアーマチュアから引きぬくと、磁石の動作位置は減磁曲線と漏洩パーミアンス係数線との交点Cにくる。ふたたび組みこんで最大パーミアンス線の位置にもどすと、リコイル線上をTにもどってくる。

次にこれを高速運転してコイルをショートすると、アーマチュアレクションによって磁石の動作点はDに下る。発電機に有限な負荷のかかった場合、動作点はDとT間のリコイル線上のF点になる。F点における全磁束はFK、有効磁束はFJである。またF点における起磁力はFM、空隙におけるドロップはXY=QMとなる。したがって漏洩磁場と空隙磁場の磁気エネルギーを差しひくと有効磁気エネルギーとしてFJXQがえられ、この中でアーマチュアーの電流の抵抗によって消費されるものを比率αで差しひくと、結局有効磁気エネルギーはFQRGとなる。この面積は菱形TDNWの面積の1/2の時が最大となる。

上記にもとずいて設計をおこなう場合にも仮定をたてて単純化をおこなっている。したがって次の点に注意をはらう必要がある。

- i 磁石の表面から漏洩がおきるので、磁石の各部分はB-H曲線上の一点で動作していないこと。
- ii 空隙線は直線とは考えられないこと。
- iii 磁極の移動を正確に掴むことの困難。
- iv 正確な磁気漏洩の算出の不可能であること。

3. 磁性の分散度

永久磁石はその用途の性質上構造材料などこととなり性能に余裕をみた材料を使うということができないのでその磁性の分散度がしばしば問題となる。現在市販されている永久磁石のパラツキの代表的な1例をあげてみると、Fig. 7

に示すとおりである。σ/̄X=2%であるので、もし±3σの範囲をとるならば約12%の程度の分散はやむをえないことであろう。

ここにA_g, B_gは空隙における面積および磁束密度B_dは動作点(BH)_{max}における磁束密度、σは漏洩係数である。永久磁石の磁気回路の磁気漏洩は空隙の周りに弧状に拡がっているフリンジング、継鉄間におこる漏洩および磁石の表面漏洩にわけられる。前二者の効果は永久磁石の同じ起磁力をうけ、有効磁気空隙の磁気抵抗と漏洩磁気抵抗を並列にならべることと等価であり、磁束はこの両者の大きさの逆数に比例して分配される。また表面漏洩は最近のような高抗磁力磁石ではその寸法が短かいので無視できる場合が多い。

磁気漏洩係数の計算は有効空隙と漏洩磁路との磁気抵抗またはその逆数のパーミアンスを求めることによつて導かれる。基本的な磁気回路についておこなつたTenzer (1956)の漏洩係数の計算方法はかなりの精

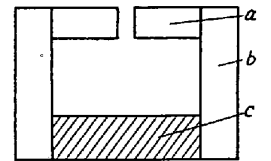


Fig. 6. A basic magnetic circuit of a permanent magnet (a, b yokes, c magnet)

度(誤差数%以下)をもつている。1例をあげるとFig. 6に示すような磁気回路における漏洩係数(σ)は次式によつて求めることができる。

$$\sigma = 1 + \frac{L_g}{A_g} \left[\left(1.7 U_a \frac{a}{a + L_g} \right) + \left(1.4 b \sqrt{\frac{U_b}{C}} + 0.25 \right) + 0.33 U_c \right]$$

- ただし U_a U_b U_c: a, b, c のそれぞれの部分の断面の周囲の長さ
- a b c: a, b, c のそれぞれの部分の磁束に平行の長さ

3. 磁性の分散度

永久磁石はその用途の性質上構造材料などこととなり性能に余裕をみた材料を使うということができないのでその磁性の分散度がしばしば問題となる。現在市販されている永久磁石のパラツキの代表的な1例をあげてみると、Fig. 7

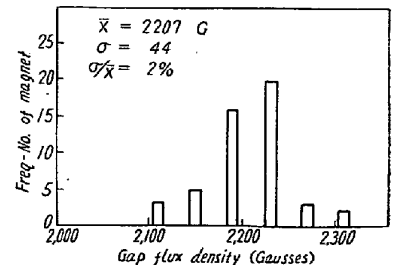


Fig. 7. Illustration of possible accuracy in manufacture of permanent magnets (PB report)

に示すとおりである。σ/̄X=2%であるので、もし±3σの範囲をとるならば約12%の程度の分散はやむをえないことであろう。

V. 磁性の経時変化

永久磁石は字に示すように一度磁化したものは永久のものであつて何時までも磁束の低下しないことが望ましいが、実際には磁区の自発的な再配列や外部からかかってくる減磁作用をうけてわずかであるが低下を続ける。これは計器の指度を狂わせたり、機械の性能を劣化させるため、使用に際してきわめて有害な現象である。これに関する問題を取り上げてみよう。

1. 磁気余効

永久磁石を磁化した後で磁束の低下する現象は、これ

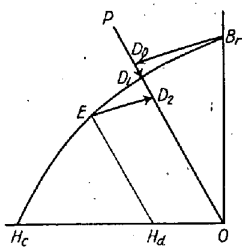


Fig. 8. After effect and demagnetization of a permanent magnet.

を2つの現象、磁気余効と減磁にわけた方が自然に理解できる。まず磁化した後、磁石を開路状態にすると、Fig. 8に示すように自己減磁場に相当したパーミアンス係数 OP 線の D_0 点に動作点が移行する。この状態から原子の熱動揺などの影響をうけて磁区の配列が安定なならび方に変化し、理想的減磁曲線上の点 D_1 にくる。これは磁壁の relaxation 現象と関連しており、磁気粘性に関する実験によつてたしかめられている。ここで示された $D_0 \rightarrow D_1$ の変化が磁気余効である。この変化 (ΔI) は時間と温度に関係し、次の式によつてあたえられる。

$$\Delta I \propto \kappa T \log t + \text{常数}$$

ただし T : 絶対温度, t : 時間

κ : Boltzmann 常数

この磁気余効の測定を長期間にわたつておこなうことは技術的にむずかしい点が多い。すなわち第1に外部から重畳してくる減磁因子を分離し難いこと、第2に測定装置の精度をあげることもおよび長期間における装置の部品および標準試験片そのものの経時変化を掴み難いことが挙げられる。たとえば永久磁石の数カ月の自然放置にともなう経時変化の文献を調べてみると、その結果がいちじるしく相違していることが認められる。

2. 外部因子の影響

外部からの減磁因子が作用すると永久磁石の動作点は OP 線上の D_2 点に低下する。 $D_1 \rightarrow D_2$ の変化が減磁現象である。減磁に影響する因子としては次のものがあげられる。

- i 外部擾乱磁場
- ii 鉄の接着または近接

iii 機械的振動または衝撃

iv 温度上昇または下降

この中で温度については他の現象とややことなるので本節では前3者の影響をとりあげてみよう。

外部擾乱磁場の影響: 外部からうける減磁因子として最も大きな作用をあたえるものは外部からの磁場であつて、とくにマグネト-や発電機などではいちじるしい。この影響に対する安定性は抗磁力の大きいものほどすぐれているが、一次式な比例関係にあるとはいえない。偶発的にかかる外部磁場に対して安定であるためには、磁石にあらかじめ減磁場 (H_d) をかけて安定減磁した状態にしておくとよい。Fig. 8に示すようにその場合の磁石の動作点はリコイル線上にあり、 H_d より小さな磁場がかかってもふたたび D_2 点にもどり、磁束の低下はない。

鉄の接着または近接: 一般にあまり問題されていないようであるが、非常に大きい減磁を誘起する。これは鉄の接着または近接により磁気回路がシャントされ磁束の方向が偏つたままで固定化が生じるためである。たとえば断面積約 2cm^2 長さ約 57mm の Alnico V 磁石を鉄板に側面で接着し、NS方向にずらせて引抜くと10回で26%の減磁がおこる。これを保護する最もよい方法は磁石を非磁性膜で被覆してやればよく、約 1mm の被膜で減磁率を1%以下に抑えることができるという。

機械的振動または衝撃の影響: これは内部歪による磁区の再配列と組織変化の促進の2つの効果がある。この減磁の大きさはくりかえし回数の対数に比例し、また合金の磁歪にも密接な関係があるといわれている。一般に機械的または衝撃による減磁率の絶対値は小さいものである。

3. 温度効果

永久磁石の温度効果は2にわけて考えられる。

i 可逆変化 常温とある温度における磁束の可逆的变化

ii 不可逆変化 温度を変化してふたたび常温にもどした場合の磁束の不可逆的な変化

可逆変化: この変化は常温から温度を次第に上昇または下降させた場合、その 1°C 当りの変化率で表わされ、これを温度係数という。この温度係数は Sixtus によるとその磁石が磁気的にみて一相であるような Alnico 3, Ba フェライトなどでは飽和磁化の強さの温度依存性と一致しており、磁石の形状や寸法などには依存しない。これに反して異方性 Alnico などの温度係数は動作点の位置に依存し、寸法比が大きくなるほど大きくなつてい

る。なお温度係数については組織、動作点などの関連性について検討を必要とする点が多い。この可逆変化による磁束変化の防止対策としては整磁鋼を副磁路として使用する。

不可逆変化：温度変化による不可逆的な減磁は高温側と低温側の両方においておこる。これは従来は熱減磁といわれていたように高温側にのみ生じ、事実古い形の磁石たとえば等方性 Alnico, Cr 鋼, KS 鋼などはこれに該当していた。しかし新しい材料である異方性 Alnico, Ba フェライトなどは低温にもつてきた後常温における磁束を測定すると顕著な減磁がみとめられる。この中で Ba フェライトは低温例でのみ減磁が生じるのが特徴である。

VI. 結 言

近代の永久磁石の研究における諸問題について概説した。しかし紙数の都合でその一つ一つにつき具体的な実験データを挙げて説明することができなかつた。永久磁石に関する研究は、わが国が世界の水準をぬいていたことはうたがう余地はない。しかし現在もなおそうであるかという点については自信をもつていうことはできないのは残念なことである。

最後につけ加えたいことは現代の永久磁石のほとんどすべてがわが国の研究者によつて発明されるかまたは緒口がつけられたものであるにもかかわらず、その工業化と改良発達を外国に委ねてしまつていゝという事実である。これは研究者も自省しなければならないことであるが、研究と実用性との間における険しい谷をうめるために政府当局も事業家も深い考慮をはらつていただきたいものである。(昭和 33 年 7 月寄稿)

正 誤 表

第 44 年 7 月号所載“鋼浴中の酸素分析試料採取法に関する研究”中次のごとく訂正す。(著者申出)

頁	行	正	誤
756	左上より 5	不透明石英管	石英管
757	左下より 13	不透明石英製保護管に	保護管に