

永久磁石の設計に關して

阪大工学部教授 藤 本 永 三

永久磁石は計測器、音響機器、小型特殊発電機等の構成要素として重要な地歩を占めるものである。磁石材料としてW鋼、Cr鋼は今なお多く用いられて居りKS, MK, NKS, OP等々の優秀な特性を有つ新材料が陸續出現して以來磁石の設計も画期的な進歩を示したが、未だ一部には旧態を脱し切らない癖がある。

第1図(a)の如き環状磁石材料の減磁特性曲線を同図(b)とすれば外部からの磁化電流零なるときの磁束密度は B_r であつて、之は磁石の保磁力 H_c による起磁力 H_{elm} によつて維持されるものと見られる。而して全磁束数は $BrSm$ であるから

$$\begin{aligned} H_{elm}/BrSm &= lm/\mu_m Sm \\ &= R_m \end{aligned}$$

は密度 Br に於ける磁石の磁氣抵抗と見られる。但し

$$\begin{aligned} \mu_m &= Br/H_c \\ &= \tan \theta_r \end{aligned}$$

はこの場合の磁材の誘磁率とする。

次に、磁化電流を負方向に加えて H_d だけの負磁化力に対して磁束密度は B_d とすれば

磁束 $B_d Sm$ が $(H_c - H_d)lm$ だけの起磁力によつて作られていることになるから、この際の磁石自身の抵抗は、

$$R_{md} = (H_c - H_d)lm/B_d Sm = lm/\mu_{md} Sm$$

但 $\mu_{md} = B_d/H_c - H_d = \tan \theta_d$

また残留磁束 Br なる状態から、磁路を開いて lg だ

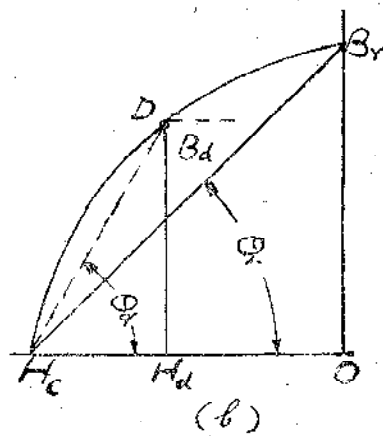
けの空隙を設けたとき磁石内の磁束が B_d に減じ同時に空隙内に $B_g = B_d$ なる磁束密度を生じたとすれば、磁石の起磁力 H_{elm} は磁石自身の抵抗 R_{md} 及び空隙の抵抗 lg/S_g のために費されることになり

$$H_{elm} = B_d Sm R_{md} + B_d lg$$

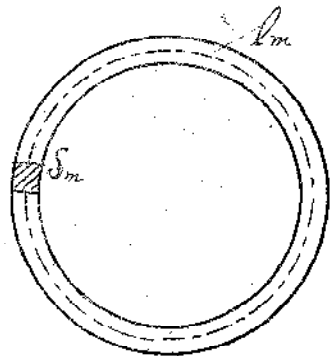
これより $H_{d1m} = B_d lg$ $B_d/H_d = lm/lg$

即ち空隙中に新に磁界を作るために要する起磁力は磁石中の H_{d1m} によつて賄はれることになる。空隙容積 $S_g lg$ 内に B_g だけの磁界を作るときは $H_g B_g S_g lg$ のエナジが蓄積されるが之は $H_d B_d Sm lm$ に等しい。即ち空隙エナジは磁石の体積と $H_d B_d$ とに比例するものであるから、 (HB) の値が最大なる点に於て磁石を作動させることが最も有効であり、また $(BH)_{max}$ の値が磁石材料の性能比較上の重要な指標となつてゐることは周知の通りである。

減磁特性曲線を双曲線と看做せば $(BH)_{max}$ の点は

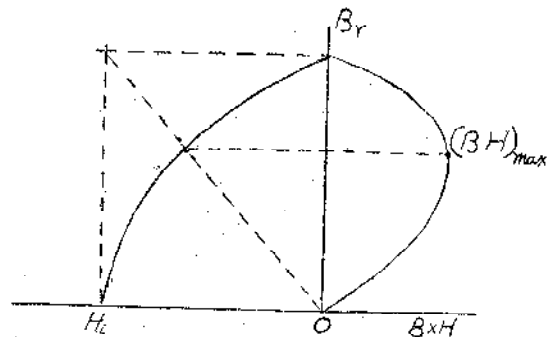


第1図 (A)



(a)

(B)



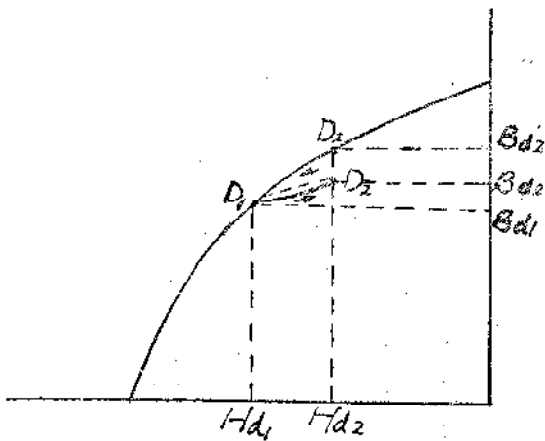
第2図

第2図の如き作図法で簡易に求められ、且つこの値は (Br/H_c) に比例することになるので (Br/H_c) の値が $(BH)_{max}$ を代表することにもなる訳である。

さて、減磁特性曲線は非可逆性のものであつて減磁が逆行する場合にはこの線上を辿らない。即ち、例えば空隙を lg_1 から lg_2 まで縮少する場合、或は空隙の無い環状磁材に於て負磁化力を H_{d1} から H_{d2} に減じた場合には磁石の作動点は第3図に於て D_1 から D'_2 には到らないで D_2 に移行し、次で空隙が再び lg_1 に増大するとき D_1 に復し、その後更に空隙が増大するとき始めて D_1 点から減磁曲線に沿つて下降する。かくて $H_{d1} \rightarrow H_{d2} \rightarrow$

(実線) (点線)

H_{d1} なる磁化力変化に伴つて $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow D_1$ の如



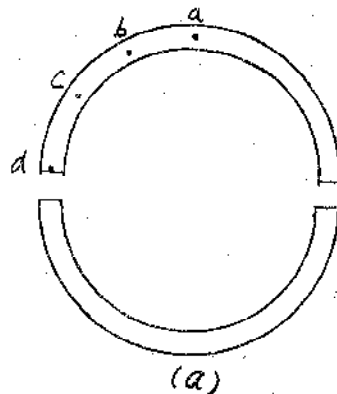
第 3 圖

き小ヒステリシス環線を描く。磁石を最初磁化する際には通常閉路状態で磁化され次で空隙が開かれるのであるが、その空隙が軟鋼片の取付等によつて縮少される際には作動点がこの小環線に沿うて移行することになるから軟鋼片取付後の磁束密度は Bd_2 となる。然るにもしこの軟鋼片を最初から取付けた儘で磁路を閉じて磁化を行い、空隙を lg_2 以上に大きく開くことが無ければ磁束は Bd_2 よりも大なる $B'd_{a2}$ に保ち得る訳であるから、事情の許す限り磁路中の空隙は磁石の作動状態よりも大きくひろげないことが肝要である。

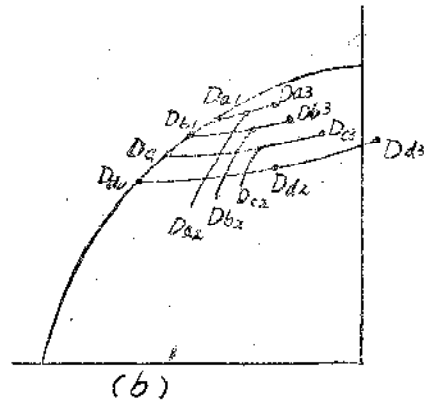
さて、以上は磁束の漏洩を考えない場合であるが、実際には勿論漏洩が生ずるので磁石の断面中の磁束密度も同一でなく空隙に近い断面ほどその密度が低くなる。随つて磁石中の各部分は、減磁曲線上の作動点の供置を異にする訳であり（第4図）磁石の起磁力は長さに沿うて $\int H_a dl$ なる積分によつて與えられる。

空隙に近い部分ほど H_a が大で磁石の起磁力に寄與することが大きい。したがつて磁石の各部分がすべて $(BH)_{max}$ の条件を満足することも不可能になる。そこで、磁軸に沿うて断面を変えて一磁束の少い一空隙に近い部分を細くし一各断面の密度を $(BH)_{max}$ 点の B の値に保つようにすれば（第五図）材料が最も有効に使用されたことになる訳であつて之は既に古く Evershed

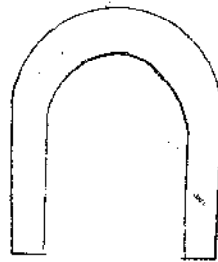
によつて示されたところである。



第 4 圖



(b)



第 5 圖

棒状磁石の場合、之を回轉楕円体形にして中央から端部に至るに随つて細くするときは全く均等な磁束密度となり材料經濟上にも最適条件を満し得ることになる。かゝる棒状磁石では寸法比 l/d に対して自己減磁係数 N の値が算出される。

而して磁化の強さ J なるとき $-NJ$ なる負磁化力が作用しているのであるから長さ l_m とすれば NJl_m だけの起磁力がこの棒磁石によつて外部空間に磁界を作るために提供されていることになる。棒磁石材料の $(BH)_m$ 点に相当する H_a の値が NJ に等しければよい訳である。而して一般に $J=(B-H)/4\pi$ $(BH)_m$ の点では $Jd = (Bd+Hd)/4\pi$ 而して $Hd=NJd$

$$よつて \quad N=4\pi Hd/(Bd+Hd)$$

かくて最適条件を満すべき N が判る。随つてこの N に対応する寸法比 l/d を選ばばよい訳である。

例えば丸棒磁石の場合

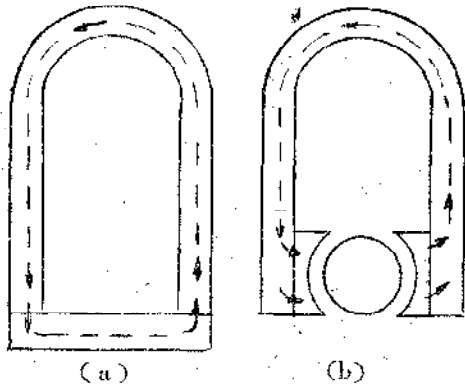
$$W鋼 \dots \dots \dots d=0.076l$$

$$36\%Co鋼 d=0.195l$$

さて、元に戻つて、磁石空隙を lg_1 から lg_2 に縮少するとき（第4図(b)）磁石上の各点 a, b, c, \dots はそれぞれ小環線に沿うて D_{a1}, D_{b1}, \dots から D_{a2}, D_{b2}, \dots に移る。而して空隙が小さくなるに随ひ漏洩が比較的に少くなるから磁石軸長に沿うての磁束密度の變化は少くなり、随つて空隙に近い部分ほど磁束の増加が著しくなるべきであつて、即ち作動点がより多く右方に移行することになる。随つてこれらの部分が寄與する磁化力は小になる。而して、もし空隙の縮少が甚しい場合には空隙に近い部分は D_{aa} 点の如く磁石としての寄與は全く無きのみならず磁石の他の部分に対する磁氣的負担となるに至る。この事柄は例えば、馬蹄形磁石の軟鉄接極子を取外したときと、之を再び取付けて磁氣的短絡に近い状

態にした場合とに就て磁軸に沿うて磁束及磁化力の分布を測つた結果からも実証される。

また、之と関連した問題として、磁石の一部分が磁化

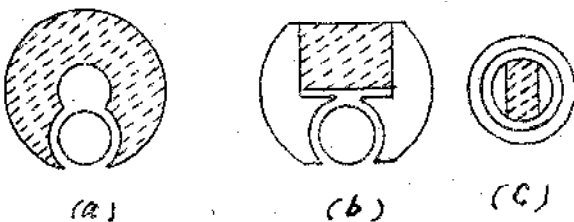


第 6 図

作業の際と磁石の使用状態とに於て磁束の方向を異にするようになる場合(第6図(a),(b)), その部分は磁石の起磁石に寄與するよりも寧ろ負担となるべきことが知られる。

よつて、磁石を磁化した後はその使用状態に於ける空隙の大きさ以上に空隙を増大することを避けると同時に磁路中の磁束の方向の変更をも避けることが望まれる。かゝる注意を拂うことによつて使用材料の量が50%も節約された実例がある。

保磁力 H_c の大きい材料は所要の長さ l_m が短く済むから、磁石の形状に旧來の馬蹄形や円形の如きを踏襲すると勢い磁石の外廻りと内廻りの長さが甚しく相違することになり、随つて磁材の各部分がすべて最適條件ではたらいしていると云う状態にはなり得ないことになる。(第7図(a)) それどころか、一部分が他の部分に対する負担となることがあり得る。之を免れるために、磁石の長さが断面全体について同一になるように磁材を矩形にして之に軟鋼極片



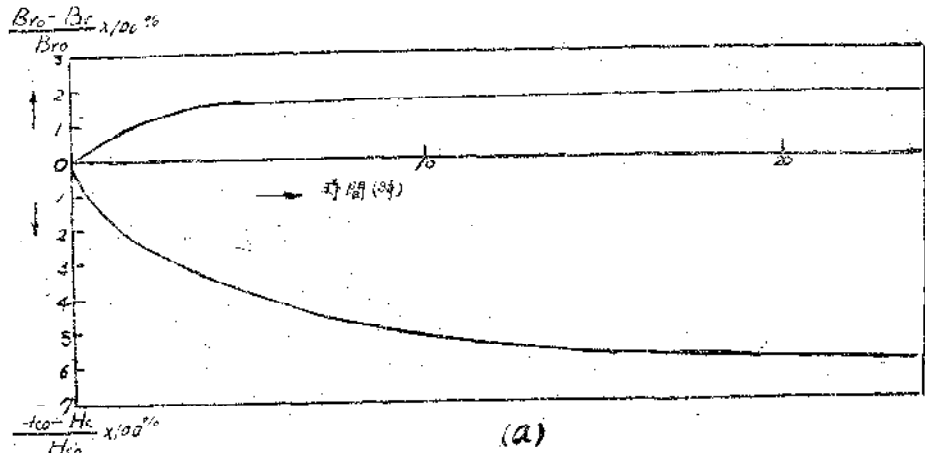
第 7 図

を附加する型式も試みられたが((b) 図)之はまた軟鋼の大きい表面積全部が漏洩磁束を發する面となるので好ましくない。で結局、所謂内部磁鋼形((c) 図) がこの種の H_c の大なる材料の場合の最適の形状なることが認められるに到つた訳である。

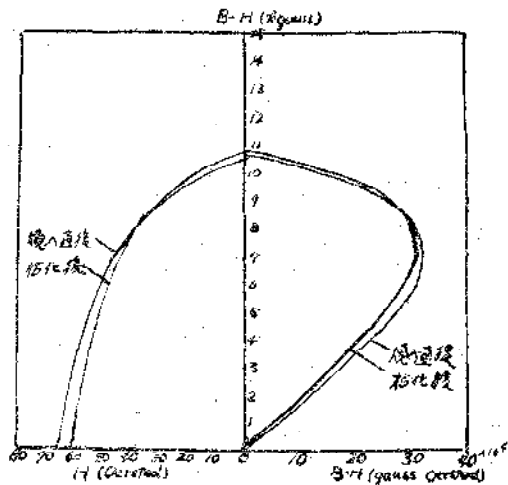
永久磁石が使用される多くの場合その磁氣的状態が長年月に亘つて不変性であり又諸種の環境変化に対して不感性であることが望ましい。これは特に計測器に用いられる場合に於て然りである。

さて磁石の磁氣的状態の変化は之をその金属組織状態の変化と磁化状態の変化とに分けて考えることが出来る。金属組織の自然変化を促進して短時日にその定常化を図るための所謂人工的枯化法として従來焼入鋼に対して行はれている方法は 100°C 位の温度に長時間曝すのであつて、その一例としてW鋼を焼入直後から 95°C の油中で加熱した場合の B_r 及 H_c の変化を示せば第8図(1)の如くであつて加熱約20時間の後略々定常化することが認められる。而してこの枯化法の前後に於ける減

第 8 図



(a)

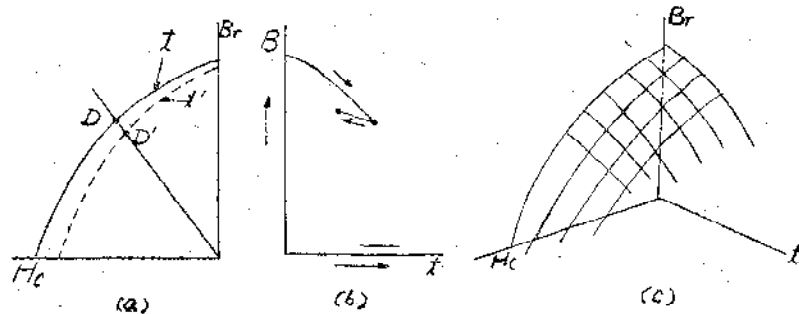


(b)

磁特性の相違は同図 (b) の通りである。

金属組織的に安定化されたものに対して更にその磁化状態の恒久性をもたせるためには、磁化状態の非可逆的変化をもたらす諸種の原因に就て予め人工的枯化法を講ずべきである。而してそれらの原因としては磁氣的、熱的及び震動的の擾乱がある。

外部からの磁氣的擾乱によつて磁石が非可逆的減磁を蒙ることは最早説明を要しない。か類的又は震動的擾乱も亦これに類した非可逆的減磁作用を結果するのであつて、例えば温度 t 及び t' に対応する減磁特性曲線を第9図 (a) の実線及び点線の如しとすれば、温度 t に



第 9 図

於て D なる作動点にある磁石が t' の温度に上昇して D' の作動点に下降し磁束密度が B_d から B'_d に減じたとすれば次で温度が t に復しても磁束は旧値に復らない。各温度に対する BH 減磁曲線群を連ねて B, H, t の3座標に就ての減磁特性曲面 (c 図) を考えるとこの面上でどんな経路でも一たび B の値が下降すれば決して元へは戻れないと云うことになる。

機械的衝撃震動の影響に就ては未だ詳でないが、軟鋼の場合について知られたところから類推すればかゝるストレスに対しても矢張り磁化の非可逆的及可逆的変化特性が現はれるものと思はれる。

すべてこれらの諸原因によつて、磁化状態が一たび減磁特性に沿うて非可逆的に低下すれば其以後は決して旧状態には戻らないで單に可逆的特性曲線上の変化を辿るのみである。

よつて、枯化法としては予め期待される程度の大きさの擾乱例えば適当な大きさの交流減磁力を加えて減磁するのである。各種の異なる擾乱の効果は相互に等價的なものと考えられ、例えば交流減磁法のみを施して熱的、震動的枯化を省くことが出来る。(之は勿論さきの金属組織枯化のための加熱と混同されてはならぬ。)

以上の如く金属組織及び磁化状態に就ての枯化法を施して恒常化された磁石と雖も、その後外部からの磁氣的や熱的的变化を蒙るときはそれに応じて磁氣状態が可逆

的的变化を示すことは已むを得ない。温度変化に対するこの変化は即ちその磁石の磁氣的性質の温度係数を與えるものである。

従來、經驗上、磁石の寸法比 l/d の大なるものがそれの smaller なものに比べて、より安全であるとされ、また特に小さい空隙を有つ磁石に対しては所謂安全係数

$$S = \frac{l_m/S_m}{l_g/S_g}$$

なるものが考えられ、この値が例えば

W 磁鋼 ($H_c = 60$) に対して $S > 300$

KS (240) $S > 50$

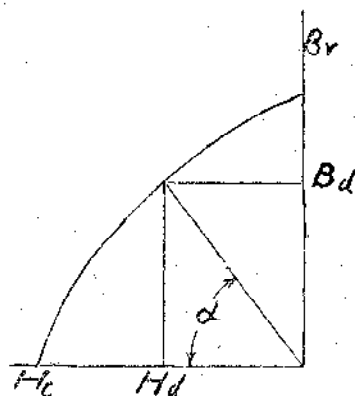
の如きが推奨された (Keinath)

さて磁石の作動点に於て

$$B_d S_m = B_g S_g \quad H_d l_m = B_g l_g$$

より

$$\tan \alpha = \frac{B_d}{H_d} = \frac{l_m/S_m}{l_g/S_g} = S$$



第 10 図

而してW磁鋼、KS磁鋼に於て作動点を $(BH)_{max}$ の点に選ぶときは $\tan \alpha = S$ の値が夫々 150, 33 となり前記の Keinath の推奨値 $>300, >50$ と云うに比べて可なり小さい。即ちさきの安全係数の推奨値を採るとすれば磁石の経済的最適條件に比べて寸法比をより大きく取ることになり随つて最適條件を外れることを免れないことになる。 $(BH)_{max}$ の点よりも稍上方 (B のより大なる値) を選ぶのがよいことを友田氏⁽⁷⁾ が指摘しているのは金属組織枯化に際して H_c の減衰が比較的長期に亘り持続するに反して B_r の変化が微量にして且速に終了する事実及び温度変化に対する特性の点よりしてもその方が有利なりと云うにある。

$(BH)_{max}$ の点では

$$\frac{d(BH)}{dB} = H + B \frac{dB}{dB} = 0$$

故に $\frac{dB}{dH} = -\frac{B_d}{H_d} = \tan \alpha$

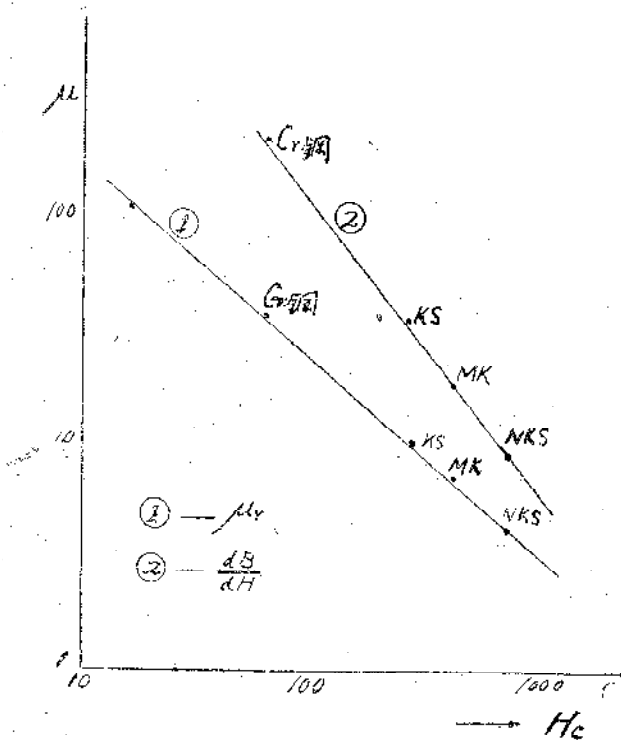
よつて、さきの所謂安全係数 $S = \tan \alpha$ はこの点に於ける微分誘磁率 $\frac{dB}{dH}$ に相当する。然るにこの場合の微分誘磁率は磁石に対して外部から減磁力が作用した場合に生ずる非可逆的減磁の程度を示すものと云える。それでこの $(BH)_{max}$ に相当するよりも磁石の寸法比を大きくとつて所謂安全係数 S を大にすると云うことは磁石の作動点を $(BH)_{max}$ の点よりも上方に移して $\frac{dB}{dH}$ の値を小さくすること——外部減磁力によつて巖る変化を小さくすることを企図しているものと考えることが出来る。

微分誘磁率の逆数を考えれば之は非可逆的減磁を生ずるために加えるべき外からの減磁力の程度を示す——即ち磁石の安定度を示す指標とすることが出来る訳である。

$(BH)_{max}$ の点に於けるこの定義による安定度の例を示せば

Cr 磁鋼	0.0144	比 (1)
KS	0.0522	(3.5)
MK	0.123	(9)

但し、之は処女減磁曲線上の非可逆的変化に対応する安定性に関するものである。実際の場合には磁氣的結化即ち交流減磁を施すので之を行つた磁石に対しては以後可逆特性線に沿うての変化が生ずるのであるから、その



第 1 1 図

場合の磁石の安定度を考えるには微分誘磁率の代りに可逆誘磁率 μ_r を採つて μ_r の逆数を以て安定度の指標とするのが妥当である。(Neumann)。この定義の安定度を例示すれば

Cr 磁鋼	0.033	比 1
NS	0.111	4
MK	0.182	6

$(BH)_{max}$ に於ける微分誘磁率と可逆誘磁率も保磁力 H_c の大なるものほどその値が小さいのであつて以上2種の安定度はいずれも H_c の大なるものほど大である。多数の磁石材料について調べた結果によれば $\log H_c$ と $\log \frac{dB}{dH}$ 及 $\log \mu_r$ の間にはそれぞれ直線関係が存することが知られている(第11図)。(2)

断面の大きい磁石はその断面を分割した方がよいことは従来唱えられている。焼入鋼では断面の太いものは焼入が均等に行はれ難いとの理由から余り大きい断面を採用しないのがよい訳であるが、それとは別個に磁石の寸法比と安定度との関連性の問題がある。例えば(2) 平たい断面の馬蹄形クロム磁石2枚を用い、各単独では $\phi = 7,000$ のものが2枚を密着するときは初め $\phi = 10,500$ を有つが間もなく減衰して 8,500 (81%) になるが、もしこの2枚を 5mm だけ離して組合したものでは初め $\phi = 11,000$ から減衰した後も 10,500 (95%) を維持したことが示されている。如斯場合には磁石の総断面 S_m は異なるのだから減磁特性曲線上の作動点は同じで $\frac{dB}{dH}$ も異なる筈であるから、上記の如き差異を示す原因は、恐らく断面の太いものでは内部と外面との間に温度の変化等に基づく局部的歪のための非可逆的減磁効果を生ずるにあるのではなからうか。このことは温度変化による磁氣減衰がその温度の変化速度の急なる場合ほど大きいと云う実験事実とも相通じて、これも恐らく磁石内部と外面との温度差に基づく局部的歪に因するものと考えられる。

要之、磁石の磁化、安定化は外部磁場、温度、震動等による非可逆的磁氣減衰を予め促進して可逆的特性線(面)上に作動せしめるようにすることであり、磁石形状の設計上よりしては断面を小さく分割すること、磁路に沿う長さを均一にすること及局部的不均一ストレスを避ける如き形状を選ぶことにある。

- (1) 友田 科学測器 昭17—5
- (2) 辻 田 昭15工学大会
- (3) 辻 田 科学測器 昭16—12