

- 2) 上野, 中野: 鉄と鋼, **41** (1955), 1179
- 3) E. C. Bain: Function of the alloying elements in steels, (1940), 114
- 4) 小門: 日本機械学会誌, **31** (1928), 954
- 5) 川口: 日本金属学会誌 **B**, **15** (1951), 213~215
- 6) C. Wells & R. F. Mehl: Trans. A.I.M.E. **140** (1940), 279
- 7) B. L. Averbach & M. Cohen: Trans. A.S.M. **41** (1949), 1024
- 8) R. W. Bailey: Proc. Inst. Mech. Eng. **122** (1932), 209

異方性 MK 磁石の研究 (III)*

(磁気的特性および工業的応用)

三 島 徳 七**・牧 野 昇***

STUDIES ON ANISOTROPIC MK PERMANENT MAGNET (III)

(On the Magnetic Properties and the Industrial Applications)

Tokushichi Mishima, Noboru Makino

Synopsis:

The magnetic properties of the anisotropic MK permanent magnet are the most excellent in commercial magnets. Its applications to industrial field are now expanding. In this report, magnetic properties, magnetic agings and industrial applications of this permanent magnet were investigated.

The magnetic properties of this magnet are listed in Table 1.

Effects of various demagnetizing factors on the magnetic stability were examined. The ratio of remanent induction decreased was in proportion to logarithm of numbers subjected to repeated demagnetization, such as alternative field, mechanical shock and attraction of iron. As for the efficient use of magnet materials, the method of design in a static circuit was illustrated numerically. Determination of leakage factors was difficult. The leakage flux depends on the reluctance of air gap in similar circuit. As the representative example of industrial uses, mention was made on permanent magnets for speaker and magnetron.

I. 緒 言

異方性 MK 磁石合金は、従来まで工業的に用いられていた永久磁石にくらべ、きわだつて優れた磁性を有しているので、その用途は急速に増大し、スピーカー、磁石発電機、電気計器、電子工学関係、機械装置などに広く使用されるようになった。この磁石の特徴を挙げるとつぎのとおりである。

(1) 工業的に製造されている永久磁石の中で、最も磁性が優れている。同一磁気エネルギーをうるための磁石価格は、低廉であつて、MT 磁石に匹敵する。(2) 磁気回路の寸法が小さくてすむので、他の関連した組立部品が節約される。(3) 磁性の安定性がきわめて高く、交流、温度、機械的衝撃などの減磁作用に対して、磁束の低下はわずかである。(4) この合金の欠点としては、稀少元素の Ni または Co の含有量の多いこと、磁気的

異方性を有していることおよび機械加工性が悪く硬く脆いことなどが挙げられる。

本報告においては、まずこの合金の代表的な減磁曲線と磁気的性質を示し、つぎに種々の減磁因子の作用する場合の減磁特性をしらべ、最後にこの磁石の工業的応用と設計の 2, 3 の例についてのべる。

II. 実験方法

異方性 MK 磁石合金の代表的な減磁曲線は、Fig. 1 に示すとおりである。従来の MK 磁石の減磁曲線を併記する。また磁気的性質の中の代表的なものの測定値をまとめると、Table 1 のようになる。この合金は、磁気的性質の中でとくに残留磁束密度の高いことと

* 第 41 回 (昭 26 年) 本会講演大会にて発表 (一部)

** 東京大学名誉教授・工博

*** 株式会社東京計器製造所磁鋼製造部・工博

Table 1. Magnetic properties of anisotropic MK magnet.

Magnetic properties			Results
Saturation induction	Bs	Gauss's	15,500
Residual induction	Br	Gauss's	12,000
Coercive force	Hc	Oersteds	600
Remanent induction at (BH) _{max}	Bd	Gauss's	9,850
Demagnetizing field at (BH) _{max}	Hd	Oersteds	485
Maximum energy product	(BH) _{max}	G. Oe	4.8×10^6
Residual flux density \times Coercive force	BrHc	G. Oe	7.2×10^6
Fullness factor	(BH) _{max} \div BrHc	%	67
Reversible permeability			$3.4 \sim 4.0$

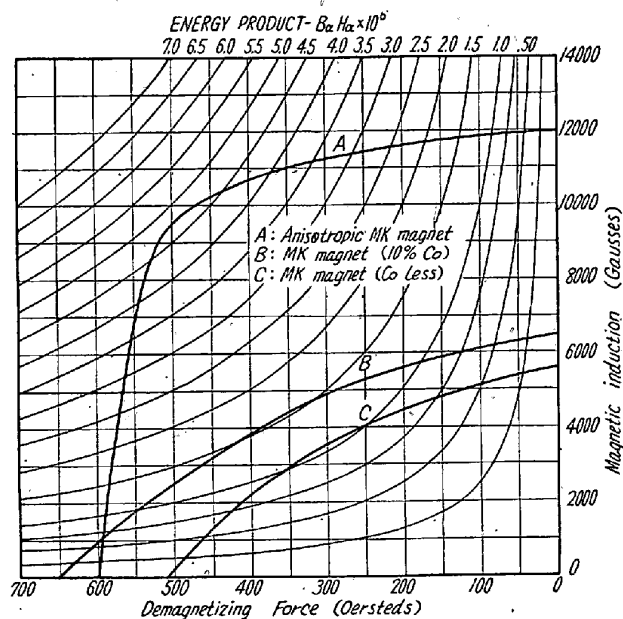


Fig. 1. Demagnetization and energy product curves of anisotropic or isotropic MK magnets.

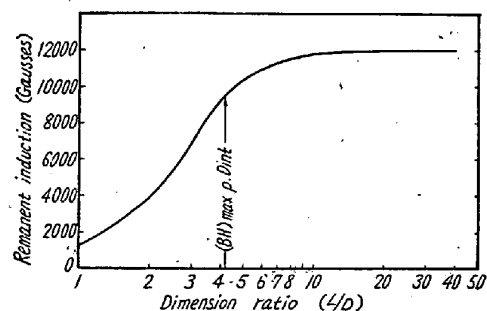


Fig. 2. Relation between remanent induction and dimension ratio in rod specimen.

上昇, 強磁性体の接着または近接などの影響を受け, また磁石内部の熱揺動による磁化ベクトルの変化も起り, これらが合成されて, いわゆる永久磁石の経時変化 (エージング) となる. つぎにこれらの減磁因子の中の二, 三についての実験結果を示す. 実験に当って注意することは, 減磁率の測定値が試料の形状または寸法, 履歴, 実験の条件によつていちじるしく影響される点である.

1. 交流磁場による減磁: この合金の丸棒試料または馬蹄形試料をコイルの中に入れ, 交流磁場による減磁率をしらべた結果は Fig. 3 に示すとおりである. もし電気計器や発電機のように外部から磁場の作用する恐れのある場合は, あらかじめ外部磁場より何割か大きい交流

(BH)_{max} が Br Hc 積に比して大きいことがわかる.

有限の長さを有する永久磁石は, 磁化されると自己の有する磁極のために反磁場が発生し, 残留磁束密度は減少し, ヒステリシスループの第2象限にある減磁曲線上の1点に対応した磁気的狀態になる. その自己反磁場は磁石の寸法や形状により異なるが, 丸棒磁石について寸法比 (試料の直径と長さの比) と残留磁束密度との間の関係を示すと, Fig. 2 のとおりになる. この磁石の最適寸法比は, 約 4.2 であり, 寸法比が 10 以上になると, 磁束密度はほぼ飽和する.

III. 減 磁 特 性

この合金は保磁力が高く, その上高温時効を行つているので, 組織の安定性も大きい. したがつてその磁気安定性は, 現在工業的に使用されている永久磁石の中で, 最も安定なものの一つである. 永久磁石の減磁に対しては, 使用中に外部から働く擾乱磁場, 機械的衝撃, 温度

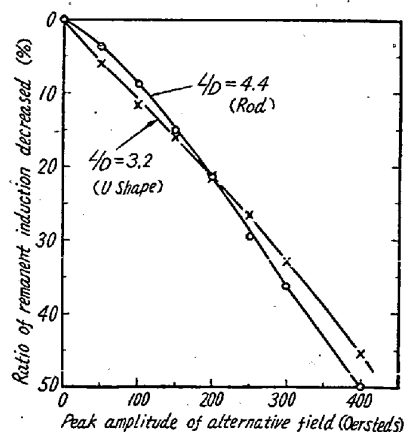


Fig. 3. Decrease of remanent induction by stray magnetic field.

磁場の中で安定化を行っておく必要がある。この合金は交流磁場のある限界値を超すと、減磁の増加する傾向を有する。つぎに繰返交流減磁を行つた場合の附加回数と減磁率の関係をしらべた結果は、Fig. 4 に示すとおりである。第2回目以後の減磁は、附加回数の対数と直線関係になつていて、回数が重なると減磁の割合は減少することがわかる。

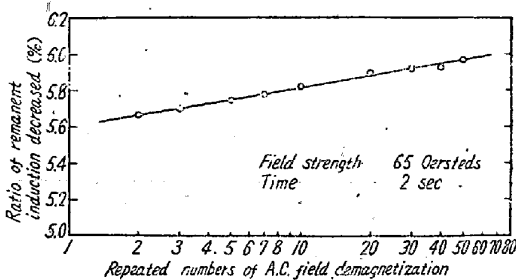


Fig. 4. Effect of repeated demagnetization by alternative field on decrease of remanent induction.

2. 衝撃による減磁: この合金の衝撃による減磁率をしらべるため、試料 (10mm 角, 70mm 長さ) を 1m の高さから木製の床の上に繰返落下せしめて、落下回数と減磁率の関係をしらべた。Fig. 5 に示すように、減磁率は 1,000 回で約 1% である。

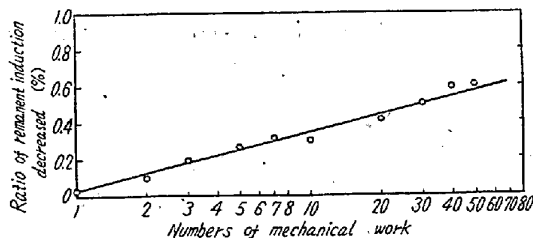


Fig. 5. Effect of repeated impacts on decrease of remanent induction.

3. 強磁性体の接着による減磁: 永久磁石に他の強磁性体を接着せしめると、新しい別の磁気回路が形成され磁束の方向または磁極の位置が移動するため減磁が起る。これは強力な磁石の場合、減磁の割合は非常に大きく、また接着の条件にも左右される。角棒磁石 (寸法は上記と同様) の一端の端面に軟鉄を接着し、つぎにこれを引離し、このような操作を繰返して、減磁率と接着回数との関係をしらべた結果は、Fig. 6 に示すとおりである。減磁率は第1回においていちじるしく、以後は対数的に減磁率は少なくなる。

IV. 磁気回路の設計

永久磁石は多くの場合軟鉄のような導磁率の高い材料と組合わせ、磁気回路を形成して使用される。磁気回路

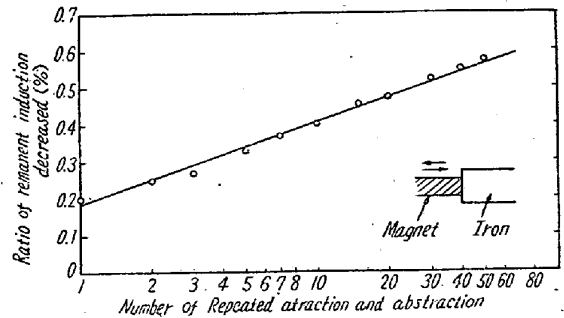


Fig. 6. Effect of attraction and abstraction by ferromagnetic material on decrease of remanent induction.

の設計が電気回路に比し、いちじるしく困難な理由として、起磁力と磁束が、電気のオームの法則における起電力と電流のように簡単な一次関係が存在しないことおよび磁気回路の表面および空隙端面において、磁束の漏洩が多く、磁石が有する磁束と空隙における有効磁束の間に大きな差異の生ずることが挙げられる。

1. 磁気回路の計算式: 静的な磁気回路において所要の空隙磁束密度をうるための磁石の最も有効な寸法すなわちその長さと断面積は、次式によつて求められる。

$$\text{磁石の長さ } L_m = \frac{B_g \times L_g}{H_d} \times r \quad (\text{cm})$$

$$\text{磁石の断面積 } S_m = \frac{B_g \times S_g}{B_d} \times \sigma \quad (\text{cm}^2)$$

ただし B_g = 空隙における所要磁束密度 (Gausses)
(空隙の磁場の強さと等しい)

L_g = 磁束の方向に平行にとつた空隙の長さ (cm)

S_g = 磁束の方向に垂直にとつた空隙の断面積 (cm^2)

H_d = $(BH)_{\max}$ の点に対応した磁石の減磁場の強さ (Oersteds)

B_d = $(BH)_{\max}$ の点に対応した磁石の磁束密度 (Gausses)

r = レラクタンス係数 (磁気抵抗係数)

σ = リーク係数 (磁気漏洩係数)

レラクタンス係数 r は、磁石の起磁力と空隙の起磁力との比で、多くの場合 1.1~1.3 の間にあり、磁気回路の種類によつてほとんど相違がない。これに反してリーク係数 σ は、磁気回路の全磁束と空隙の有効磁束との比で、磁気回路の形状によつていちじるしく相違し、空隙のレラクタンスや磁路の相対関係位置を考慮して、適当な値をとらなければならない⁽¹²⁾。

2. 磁気漏洩: 磁気回路の形状を変化せしめて磁気漏洩をしらべた。回路の継鉄部分は、軟鋼の角形の板 (断面積 30×9mm, 長さ 50~80mm) を組合わせた簡単な形状のもので、1例として空隙をはさむ部分の継鉄の

板の数を 1, 2 および 3 枚と増加せしめて、磁気漏洩係数と空隙の長さとの関係を求めた結果を Fig. 7 に示す。空隙の長さのある範囲までは、両者は直線関係にある。もし横軸として、空隙長さの代りに空隙の磁気抵抗すなわち空隙長さと空隙面積との比をとつて、グラフを書き直すと、B, C 曲線はいずれもほぼ A 直線と一致し、わずかに平行に下方にずれている。このことは特別な場合を除いて、おなじ形式の回路では漏洩係数と空隙のリラクタンسとの間には、一定直線関係があるといえる。

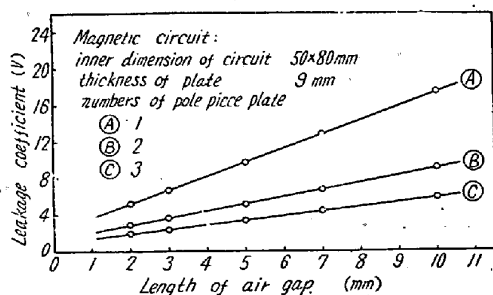


Fig. 7. Relation between leakage coefficient and length or area of air gap in a simple circuit.

実際に使用されている代表的な 2, 3 の磁気回路のリラクタンسと磁気漏洩との関係をしらべると、Fig. 8 に示すとおりである。磁気回路の種類に応じて、この関係図を求めておけば、与えられた要求に応じて、上式より計算を行うことができる。

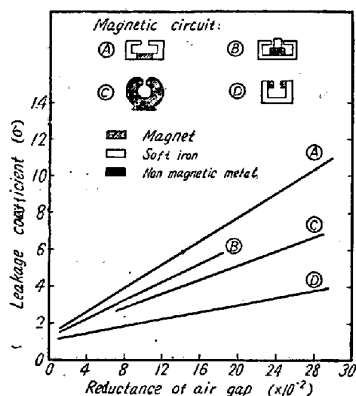


Fig. 8. Relation between leakage coefficient and reluctance of air gap in various magnetic circuits.

V. 工業的応用

現在この異方性 MK 磁石合金の用途は、次第に拡大し、他の永久磁石の用途をおきかえた許りでなく、従来永久磁石の使用されなかつたような分野にも、その磁性の優秀さのために広く使用されるようになった。これら

工業的応用の中で、代表的な例としてスピーカ用磁石とマグネトロン用磁石の設計例をのべる。

1. スピーカ用磁石：ダイナミックスピーカ用の磁気回路には、この合金がほとんど使用されている。磁石の形状は円筒状であり、寸法は 20~30mm 径、20~30mm 高さのものが多く、磁気回路の組立図は Fig. 9 に示すとおり、軟鉄のヨークで磁路を形成している。

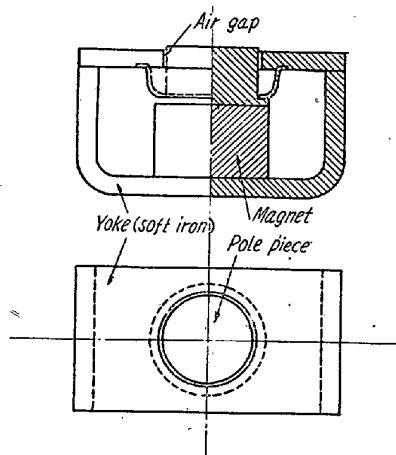


Fig. 9. Representative magnetic circuit for dynamic speakers.

スピーカ磁気回路の 2, 3 の実際に使用されているデータを挙げると、Table 2 に示すとおりである。

磁気回路の計算方法の 1 例を示そう。スピーカのコーンに付いているムービングコイルのセットされる磁気空隙の面積 (A_g) を 5.0cm^2 、間隔 (L_g) を 0.12cm とした場合、磁気回路の空隙磁束密度 (B_g) を 6400 Gauss とするに必要な磁石の寸法はつぎのように求められる。

上記 (1), (2) 式において、 B_g , L_g および A_g は上に示されており、既知である。また Table 1 に示すように $B_d = 9850\text{ Gauss}$, $H_d = 485\text{ Oersteds}$ である。リーケージ係数 σ は、Fig. 8 (B) より 1.8 となり、リラクタンس係数 r は、ヨークおよび接合部空隙の磁気抵抗を考慮すると、約 1.2 となる。これらを上式にそれぞれ代入すると、

磁石寸法：長さ $L_m = 1.9\text{cm}$ 、面積 $A_m = 5.85\text{cm}^2$ となる。したがって工業的に生産される製品に対しては若干の安全率をとつて考えると、必要な磁石の寸法は、長さ 20mm 、径 28mm であることがわかる。

2. マグネトロン用磁石：レーダーその他の電子関係に用いられるマグネトロンの磁界発生用に使われる永久磁石は、強力なものを必要とされる。船舶用大型レーダーに使われる永久磁石の形状は、Fig. 10 に示すとおりで、全重量 3.6kg 、空隙寸法 2.0cm 径 $\times 1.6\text{cm}$ で

Table 2. Dimensions of magnetic circuit for speakers.

Maker	Dimension of magnetic circuit			Flux density in air gap (Gausses)	Dimension of permanent magnet (mm)
	Thickness of yoke (t) (mm)	Diameter of pole piece (D) (mm)	Length of air gap (Lg) (mm)		
A	4.5	14	0.9	6200	20 ϕ × 20
B	5.2	20	0.95	6500	25 ϕ × 20
C	6.0	25.4	1.125	6400	30 ϕ × 20

ある。所要空隙磁束密度 B_g は 5400 Gausses とすると必要な磁石の大きさは、つぎのように求められる。

(1) (2) 式より磁石の容積:

$$V_m = L_m \cdot S_m = B_g^2 \cdot L_g \cdot S_g \cdot r \cdot \sigma / B_d \cdot H_d \dots (3)$$

ここにおいて $\sigma = 14.5$, $r = 1$ となり、また磁石の形状の関係で磁石の長さがある程度長く取る必要がある上に、大型磁石のため性能に対する安全係数を大きく取って、 $B_d H_d = 4.3 \times 10^6$ Gauss · Oersteds とすると、上式より容積 $V_m = 494 \text{ cm}^3$ となる。したがって所要磁石の重量は 3.6 kg となり、実際のものと一致する。

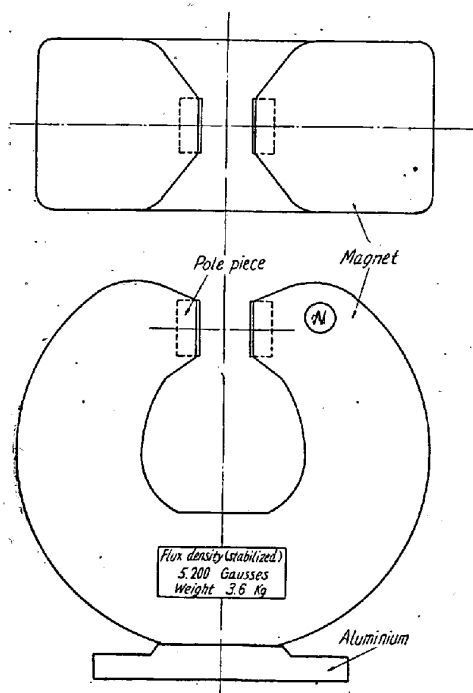


Fig. 10. Magnet for magnetron tube.

VI. 総 括

異方性 MK 磁石に関する磁性、減磁特性、設計および工業的応用について実験を行った。

1. この磁石は工業的に使用されている永久磁石の中で最も性能が優れており、しかも同一エネルギーをうるに必要な価格は低廉である。

2. 磁場処理方向に測定した磁性は、残留磁束密度 12,000 Gausses, 保磁力 600 Oersteds, 最大磁気エネルギー積 4.8×10^6 Gauss Oersteds である。

3. 減磁に対する安定性は優れている。減磁の作用回数対数と減磁率とのグラフは、直線関係となる。

4. 静的回路における設計の計算方法について説明し最も大きな因子である磁気漏洩係数を測定し、回路空隙の磁気抵抗と関係あることを求めた。

5. この合金の工業的応用は拡大してきたが、その代表的な製品として、スピーカー用磁石およびマグネトロン用磁石の設計例を示した。

終りにのぞみ本論文の第1報より第報3にいたる実験に対し桜井昭二君、金井良昭君、山川和郎君および三島通雄君の御協力をえた。ここに深く謝意を表する次第である。(昭和 31 年 5 月寄稿)

文 献

- 1) 牧野, 三島(通): 計測 5 (1955) p. 548
- 2) 牧野, 三島(通): 計測 6 (1956) p. 114