

電装用モータへのフェライト磁石の応用

Application of Ferrite Magnet to Car Motors

原 田 英 樹*
Hideki Harada

菊 田 明*
Akira Kikuta

安 部 正 道*
Masamichi Abe

要 旨

電装用直流モータは従来、励磁方式としてコイルを用いた電磁石式が用いられてきたが、最近すぐれた特性のフェライト磁石が開発され、原価低減、性能向上、信頼性向上、小形化などの要望とあいまって、このフェライト磁石を用いた磁石式の直流モータがクローズアップされるに至り、この磁石式が従来の電磁石式にとって変わりつつある。そこで本稿においては、磁石を使用した場合の磁氣的解析、磁石特性とモータ特性の関係および磁石式にした場合の問題点につき検討し、さらに異方性フェライト磁石を使用した場合の諸特性についても検討を行なった。その結果、直流モータ用フェライト磁石設計に関する諸データが得られ、モータ特性に及ぼすフェライト磁石の諸特性が明らかとなった。異方性フェライト磁石については、等方性フェライト磁石に比べ、約30~60%の特性向上が得られた。

1. 緒 言

昭和37~38年当時電装用直流モータは、ステータに界磁巻線をした電磁石式のものが使用されていた。しかし、原価低減、性能向上、小形化などの要望が高まり、日立金属株式会社熊谷工場でもフェライト磁石の電装用モータへの応用の研究を始めた。永久磁石をモータへ用いた場合の利点としては下記の諸点が考えられる。

(1) 原 価 低 減

ステータコア、巻線およびポールピースを磁石におきかえることにより、組立工数は減少し、原価は低減する。

(2) 性能向上、小形化

ステータ巻線への電力の供給が不要となり、性能が向上する。またステータコアに比べ、磁石厚みを薄くできるので、小形化が可能となる。

(3) 信頼性の向上

永久磁石であるため、巻線の場合のように絶縁不良など、電気回路に起因する事故が減少し、信頼性が増す。

当初は電磁石の部分永久磁石におきかえただけのものではあった。試験の結果、永久磁石式で実用可能な見通しができたが、鋳造磁石を使用したものについては、コスト的に問題があったので日立金属株式会社熊谷工場では、フェライト磁石を応用するために各種の研究を行なった。一般に電磁石式をフェライト磁石式に変える場合、ポールコアの内径、長さを一定にすると磁石式は電磁石式に比べ、磁束が約20~50%小さくなるために、電機子コイルの巻数を多くする。そのために1個のセグメント当たりのインダクタンスが増加して、火花が生じやすいという、整流上の問題点が生ずるが、これはセグメント数を多くするというで解決できる。また、巻線を多くすると線径が小さくなるため、温度上昇の点から入力を小さくすることなどにより、フェライト磁石式が従来の電磁石式に完全におきかわるに至った。以下、フェライト磁石を使用した場合の諸特性および問題点について詳述する。図1は最近のモータ用フェライト磁石を示したものである。

2. 電装用モータの構造と特性

2.1 供 試 モ ー タ

本実験に使用したモータの構造を図2に、モータ仕様を表1に示す。

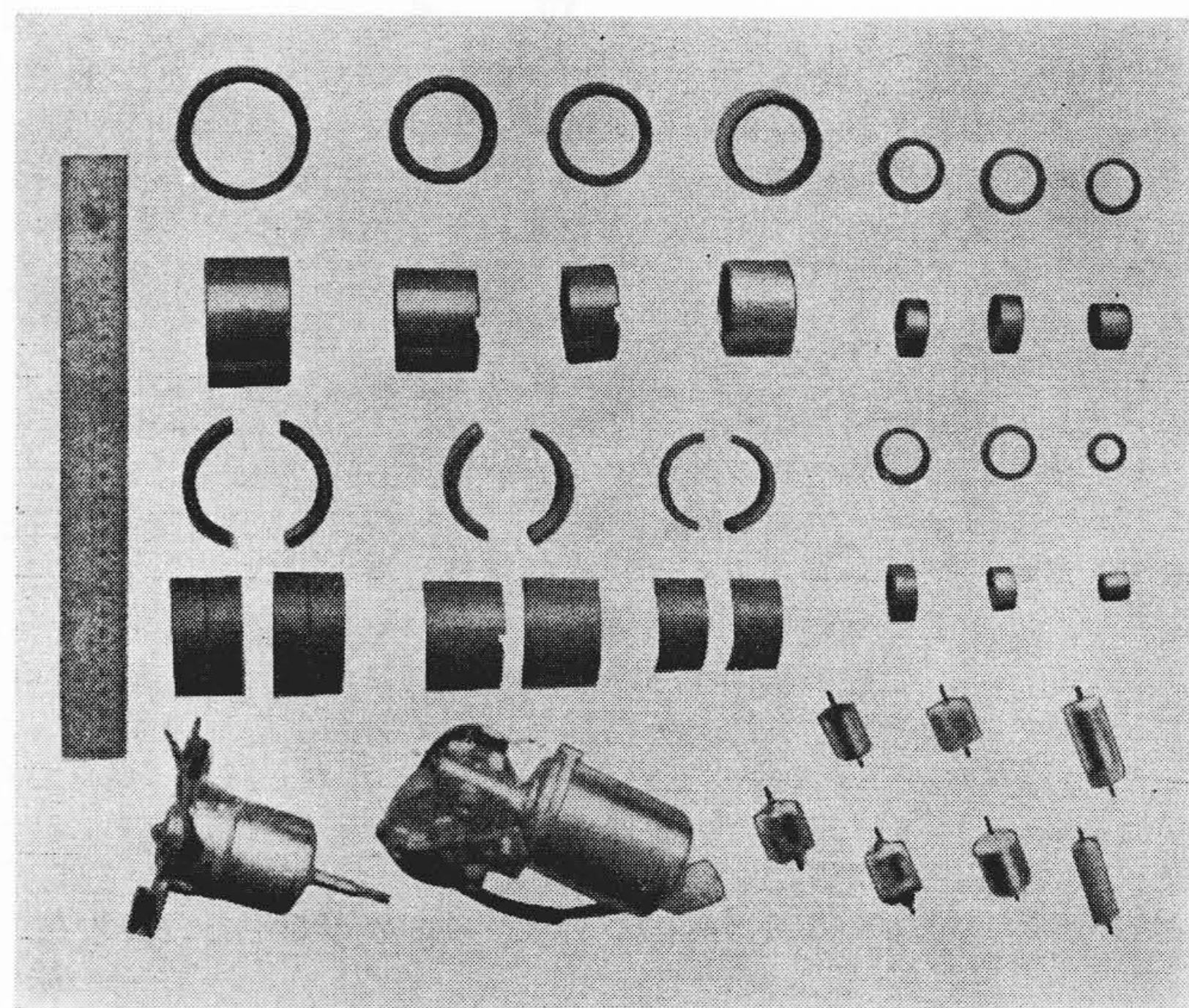


図1 直流モータ用フェライト磁石

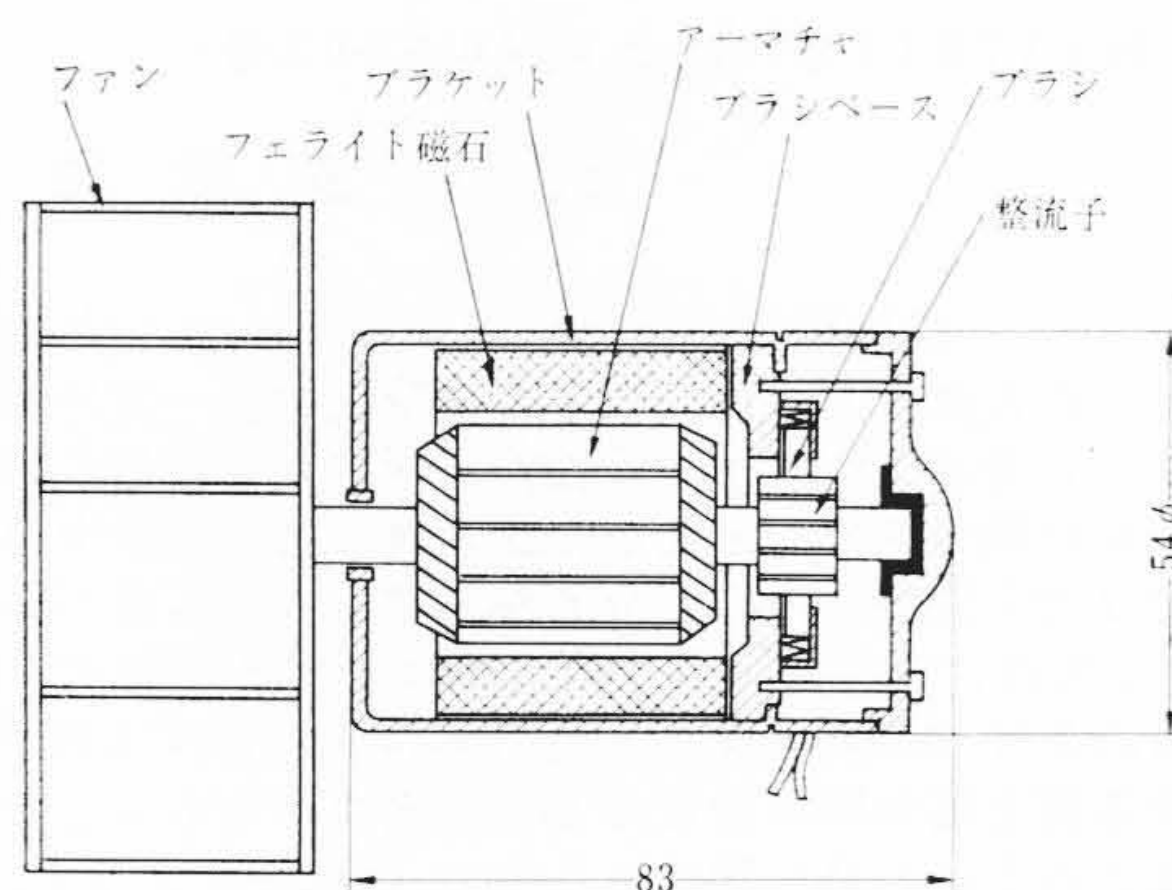


図2 供試モータ概略図

表1 供試モータの仕様

定 格 印 加 電 圧	DC 12 (V)
定 格 負 荷	約 350 (g·cm)
定 格 電 流	3.7 (A) 以 下
定 格 回 転 数	3,200±250 (rpm)
磁 石 形 状	50.8φ×40.3φ×25
ア ー マ チ ャ	38.8φ×20 12 slot
整 流 子	12 segment

* 日立金属株式会社熊谷工場

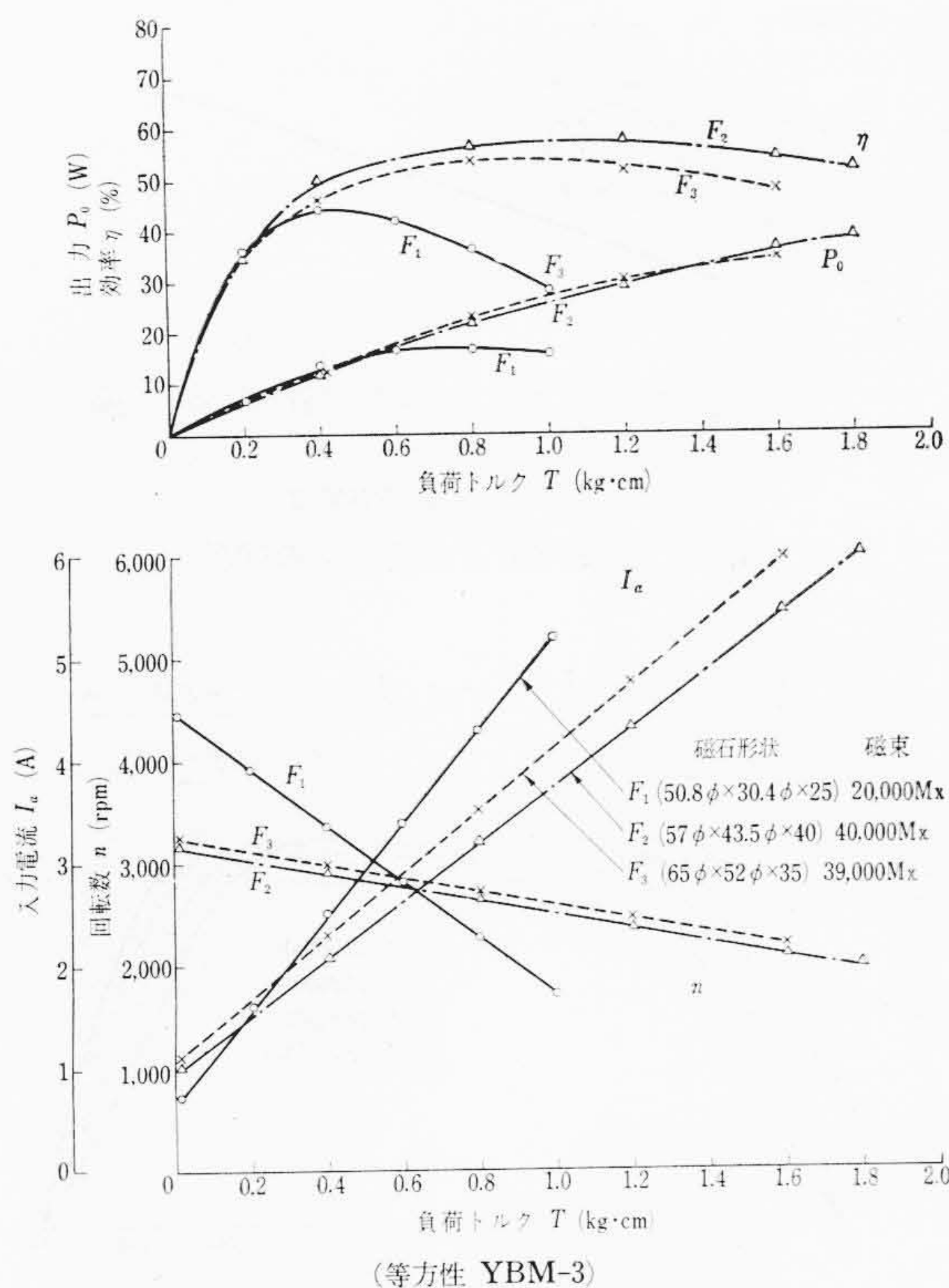


図3 磁石式モータ特性の一例

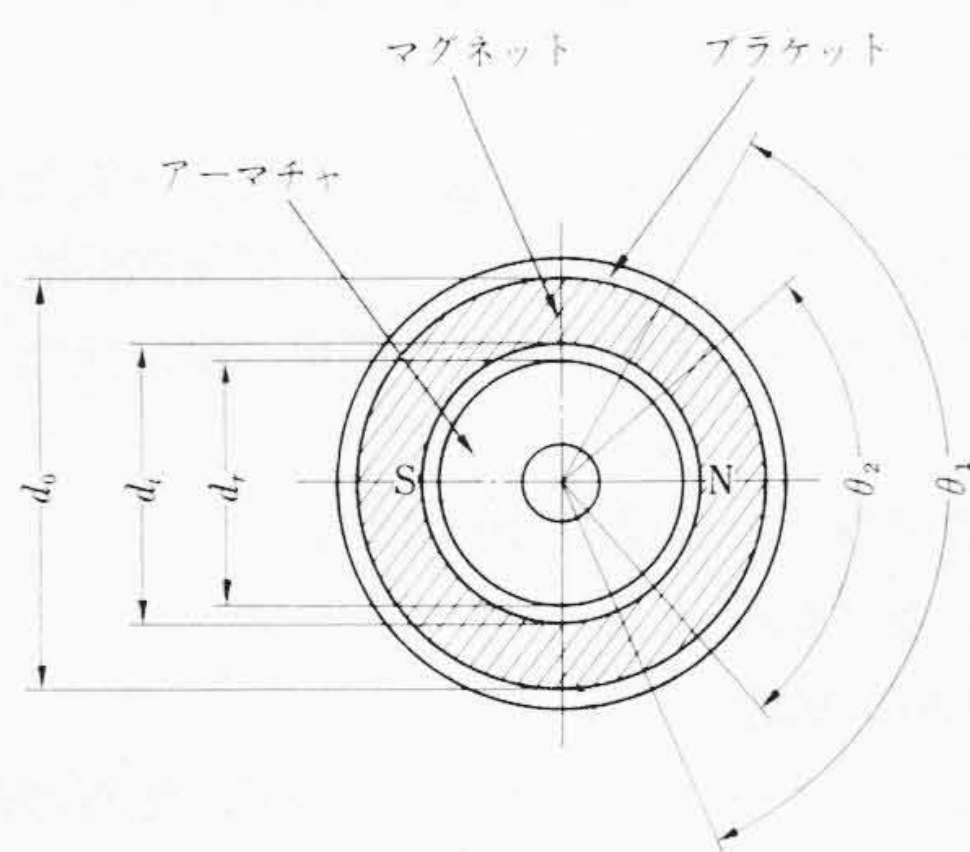


図4 各部の記号

2.2 モータ特性

永久磁石を使用したモータの特性は図3に示すとおりである。磁石式直流モータの特性は、励磁を磁石によって行なう一定励磁方式であるから、トルク回転数特性は直流分巻モータに似ており、モータ特性は、一般の直流機理論によって説明される。

3. 磁気回路の解析

一般に、リング形フェライト磁石の空げき有効磁束 Φ_g は、下記の方法で近似的に求めることができる。

磁石断面積 A_m は

$$A_m = \frac{d_o + d_i}{2} \cdot \frac{\pi \theta_1}{360} \cdot W \quad (\text{cm}^2) \quad (1)$$

磁石長さ L_m は

$$L_m = \frac{d_o - d_i}{2} \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

空げき断面積 A_g は

$$A_g = \frac{d_i + d_r}{2} \cdot \frac{\pi \theta_2}{360} \cdot W \quad (\text{cm}^2) \quad (3)$$

空げき長さ L_g は

$$L_g = \frac{d_i - d_r}{2} \quad (\text{cm}) \quad (4)$$

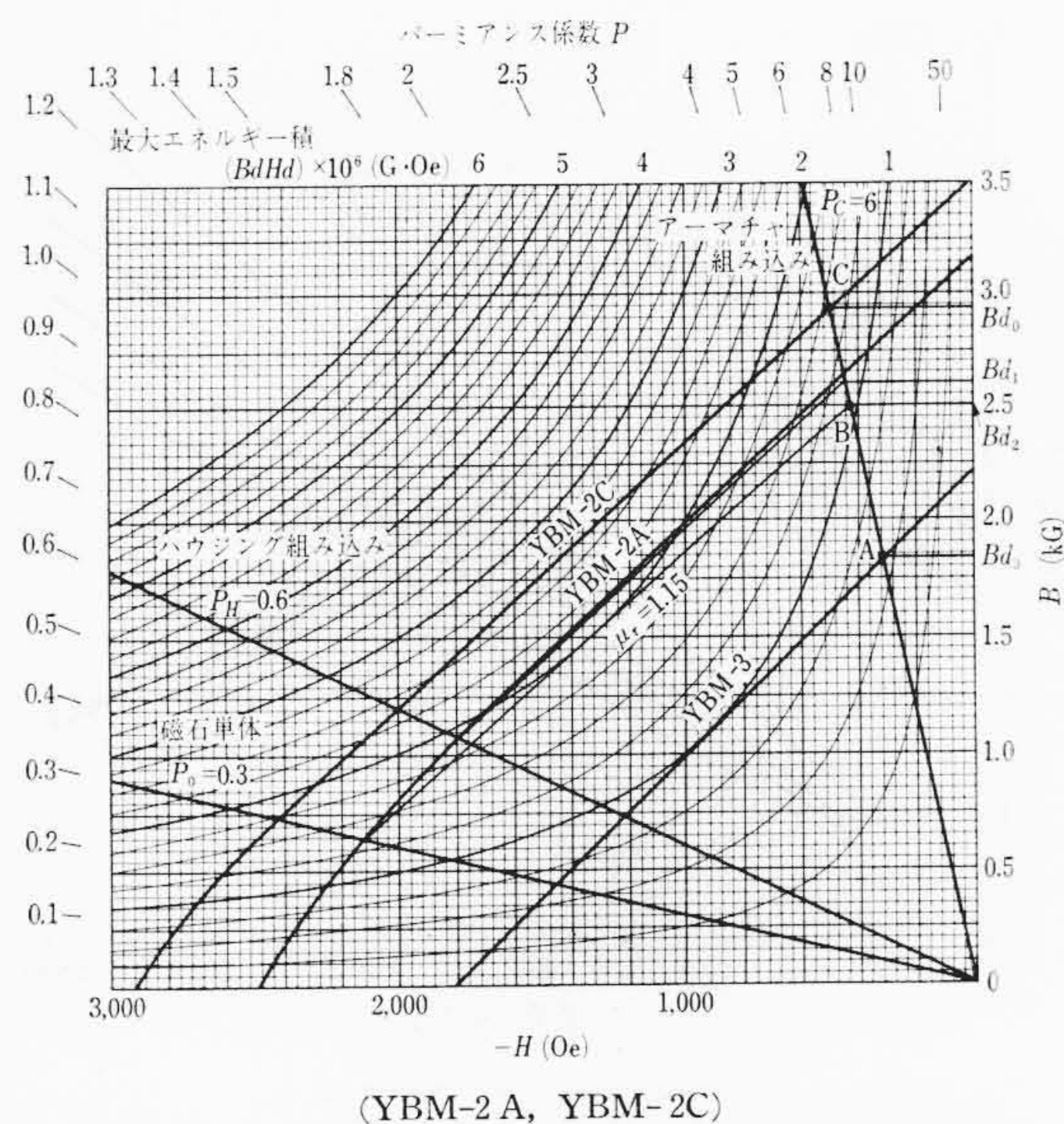


図5 異方性フェライト磁石の磁気特性

で表わされる。

ここに、

- d_o : 磁石外径 (cm)
- d_i : 磁石内径 (cm)
- W : 磁石の軸方向長さ (cm)
- d_r : アーマチュア外径 (cm)
- θ_1 : 着磁角 (度)
- θ_2 : 磁束収束角 (度)

動作点のパーミアンス係数 P_c は次式で示される。

$$P_c = \frac{L_m A_g}{A_m L_g} \cdot \frac{f}{r} = \frac{d_i + d_r}{d_i - d_r} \cdot \frac{d_o - d_i}{d_o + d_i} \cdot \frac{\theta_2}{\theta_1} \cdot \frac{f}{r} \quad (5)$$

ここに、 f : 漏えい係数 (ブロー, ワイパモータなどのスロット数の多いものは約1.2, スロット数の少ないマイクロモータでは約1.9)

r : 接着係数 ($r \approx 1$)

動作点の磁束密度 B_d は、等方性フェライト磁石の場合は $B-H$ カーブと動作点 P_c の交点 A となるが、異方性フェライト磁石 (YBM-2A, YBM-2C) のように、第2象限に曲折部をもつものについては、磁石単体のパーミアンス係数 P_0 よりの可逆透磁率 $\mu_r \approx 1.15$ の線と P_c の交点が動作点の磁束密度 B_d となり、YBM-2A では B 点、YBM-2C では C 点となる。この B_d がわかると空げきの有効磁束 Φ_g は、次式で求めることができる。

$$\Phi_g = \frac{B_d A_m}{f} \quad (6)$$

ただし、この有効磁束はブラケットの厚さ、アーマチュアのラミネート積厚などによって変わり、本実験では、

- (1) ブラケット厚み $T_B = 1.4 \sim 1.6 \text{ mm}$
- (2) 磁石の軸方向長さ W_m とアーマチュアのラミネート積厚 W_a の比が $W_m/W_a = 1.1 \sim 1.3$
- (3) 空げき寸法 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$

で計算値と実測値はほぼ一致する結果が得られた。

4. モータ特性に及ぼす磁石の諸特性 (モータ用フェライト磁石の基本設計)

4.1 空げき寸法の影響

4.1.1 磁石外径一定の場合

磁石の外径 d_o を一定とし、内径を大きくしていった場合の空げき長さ (L_g) と、モータ特性の関係を示したのが図6である。

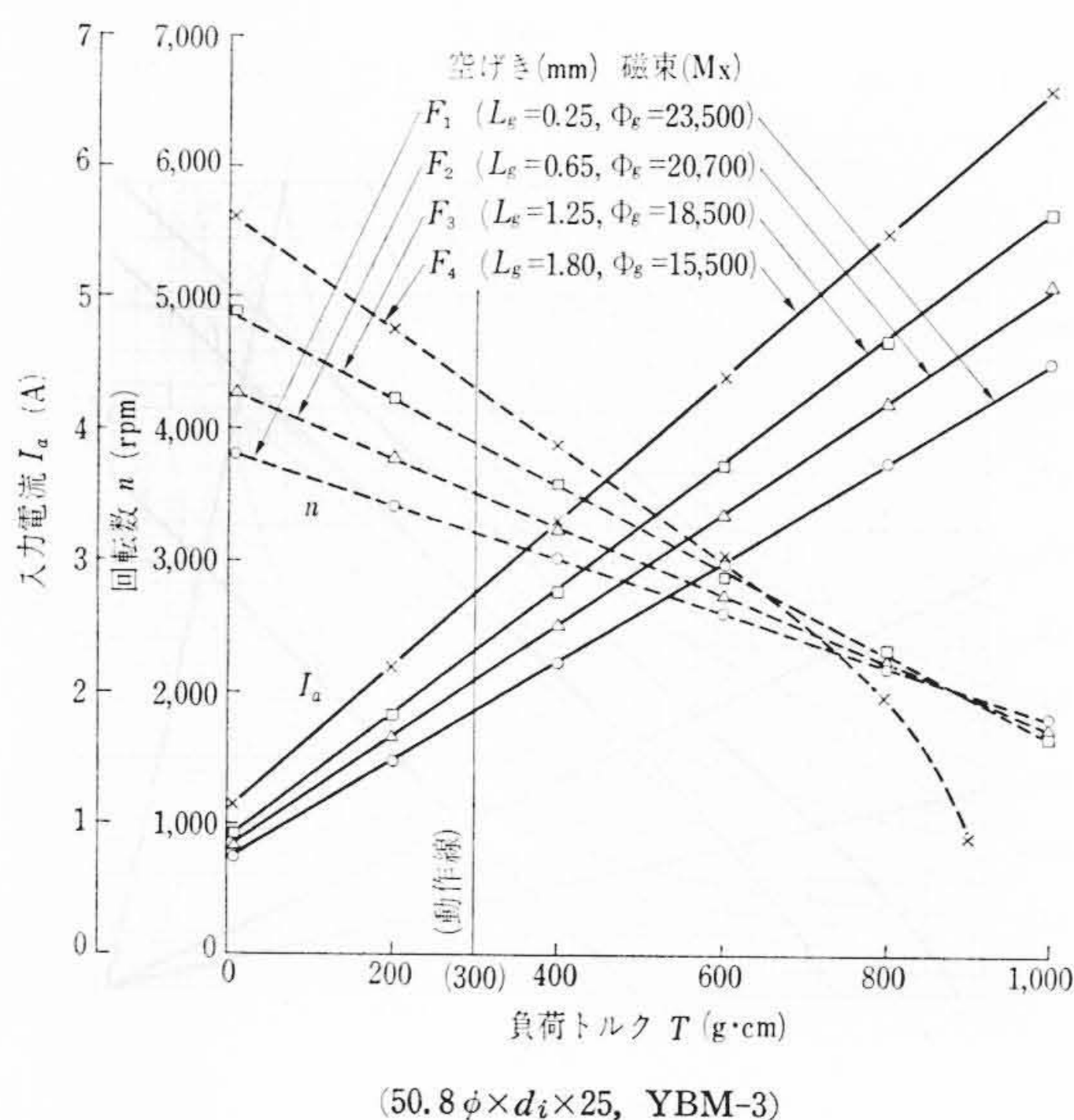


図 6 空げき長さ (L_g) とモータ特性の関係

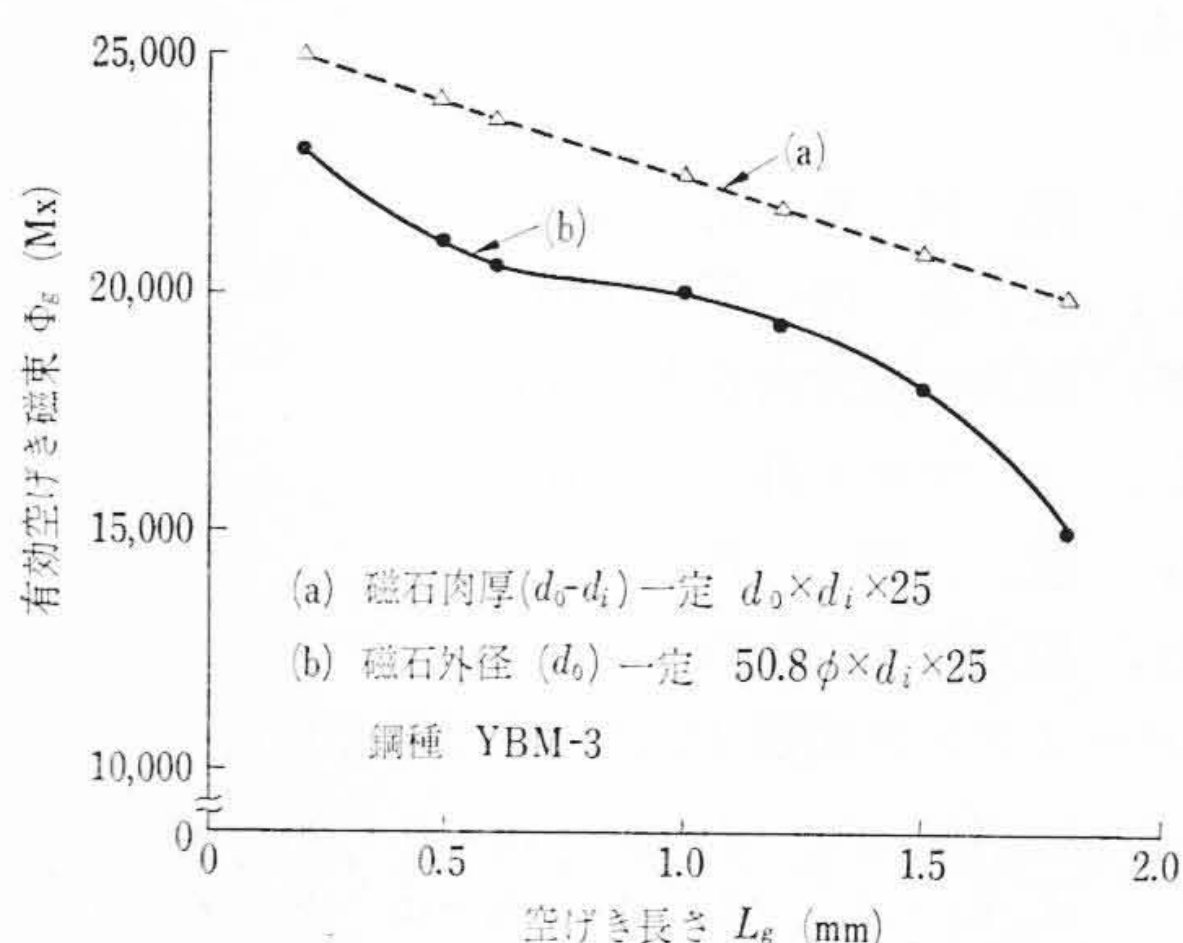


図 7 空げき長さと有効磁束の関係

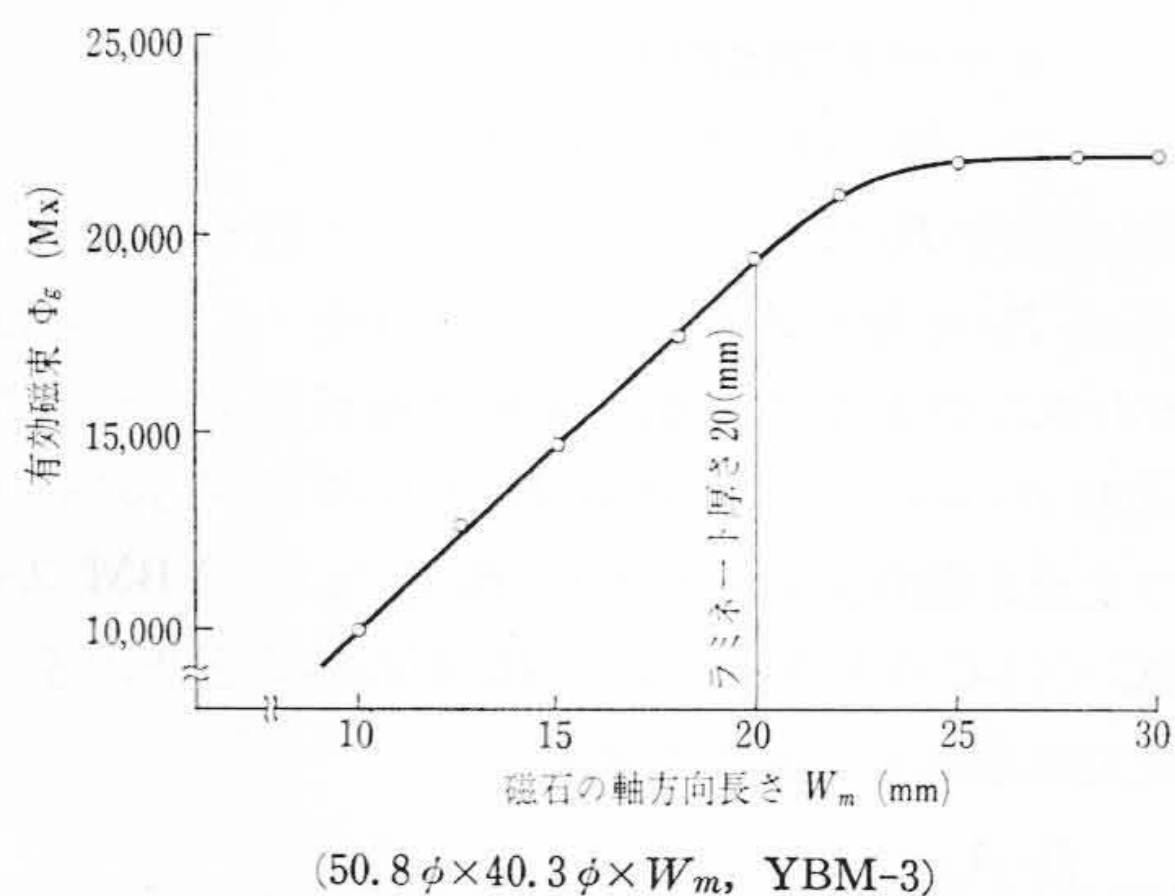


図 8 磁石長さと有効磁束の関係

モータ特性は、磁束 Φ_g の大きいほど入力電流は小さくなり、回転数は軽負荷では低く、重負荷では高くなるという傾向を示す。空げき長さ (L_g) と磁束の関係は図 7 に示すように、空げきが大きくなると空げきの磁気抵抗が増大し、作動点が低下するほか、漏えい磁束が多くなり、また外径を一定にしているのも、それだけ肉厚 (磁石長さ L_m) が減って有効磁束 Φ_g は減少する。ここで $L_g-\Phi_g$ 特性は直線とはならず、0.6~1.0 mm の間である程度フラットな特性を示す。これと磁石内面を無研磨にしてコスト低減を図ることを考慮に入れて

空げき長さは、 $L_g=0.6\sim 1.0$ (mm)

の範囲にとるのが望ましい。

4.1.2 磁石肉厚一定の場合

磁石の肉厚を一定にして、空げきをかえた場合の $L_g-\Phi_g$ 特性

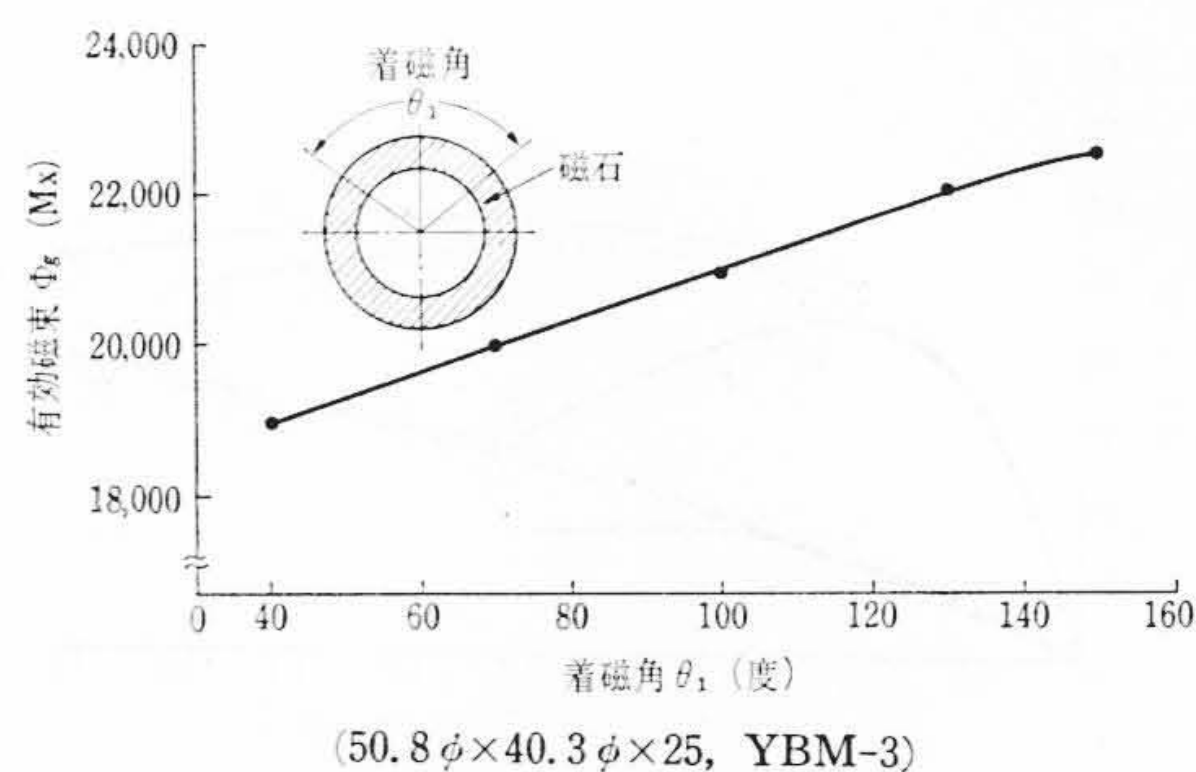


図 9 着磁角度と有効磁束の関係

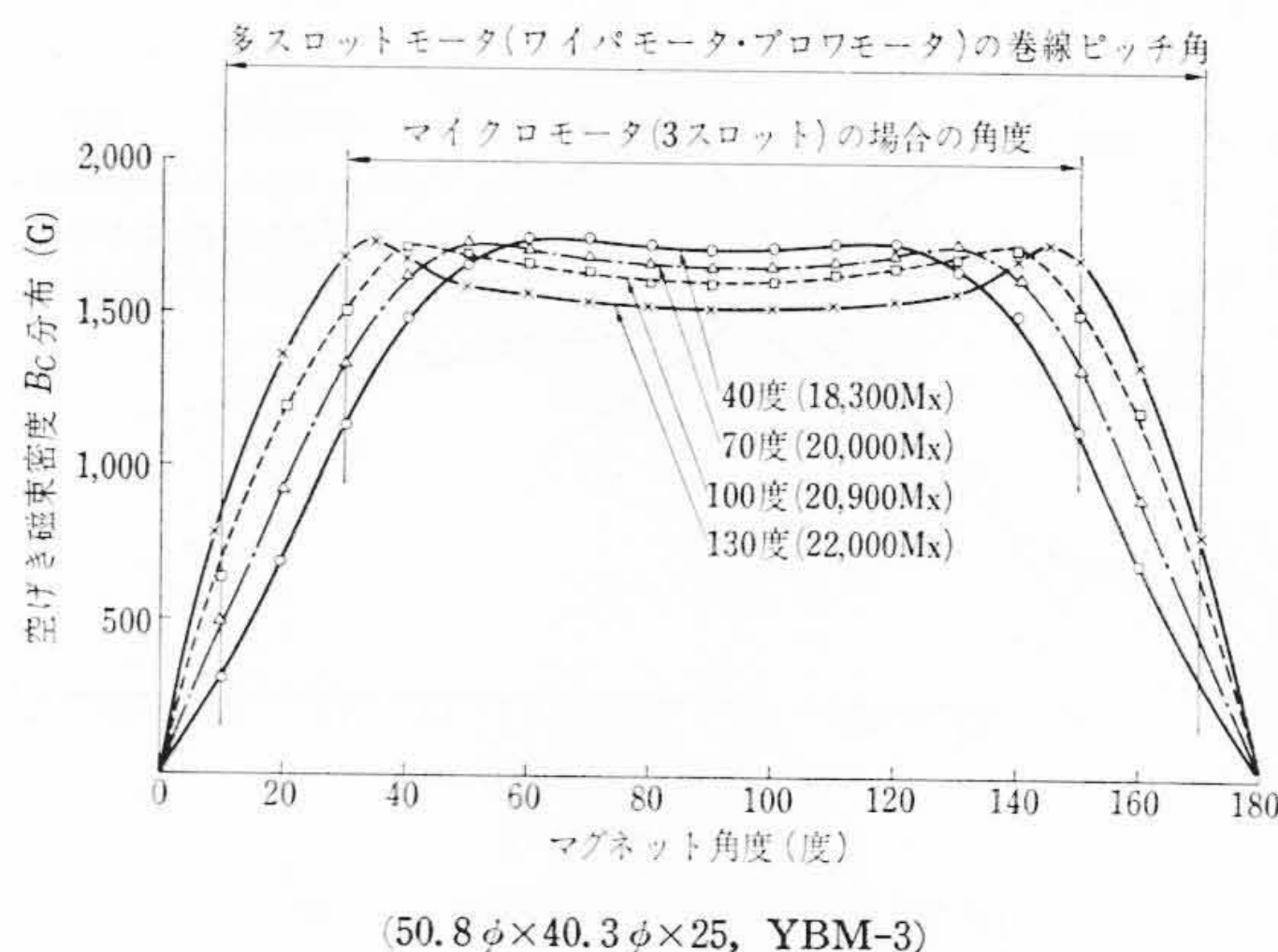


図 10 着磁角と B_c 分布の関係

は図 6 に示すように、外径を一定とした場合と異なり、その相関は直線的となる。なお、磁石の肉厚は、磁気回路的には薄くすることが可能であるが、機械的強度、磁束の安定性などの点を考慮して

磁石の肉厚は、外径の 10~13%

程度にする必要がある。

4.2 磁石長さの決定

アーマチャのラミネート厚さを一定として、磁石の軸方向の長さを変化した場合の有効磁束の関係を示したのが図 8 である。これより磁石の長さは、ラミネート厚さの 120~130% にとるのが望ましい。

4.3 着磁角度の影響

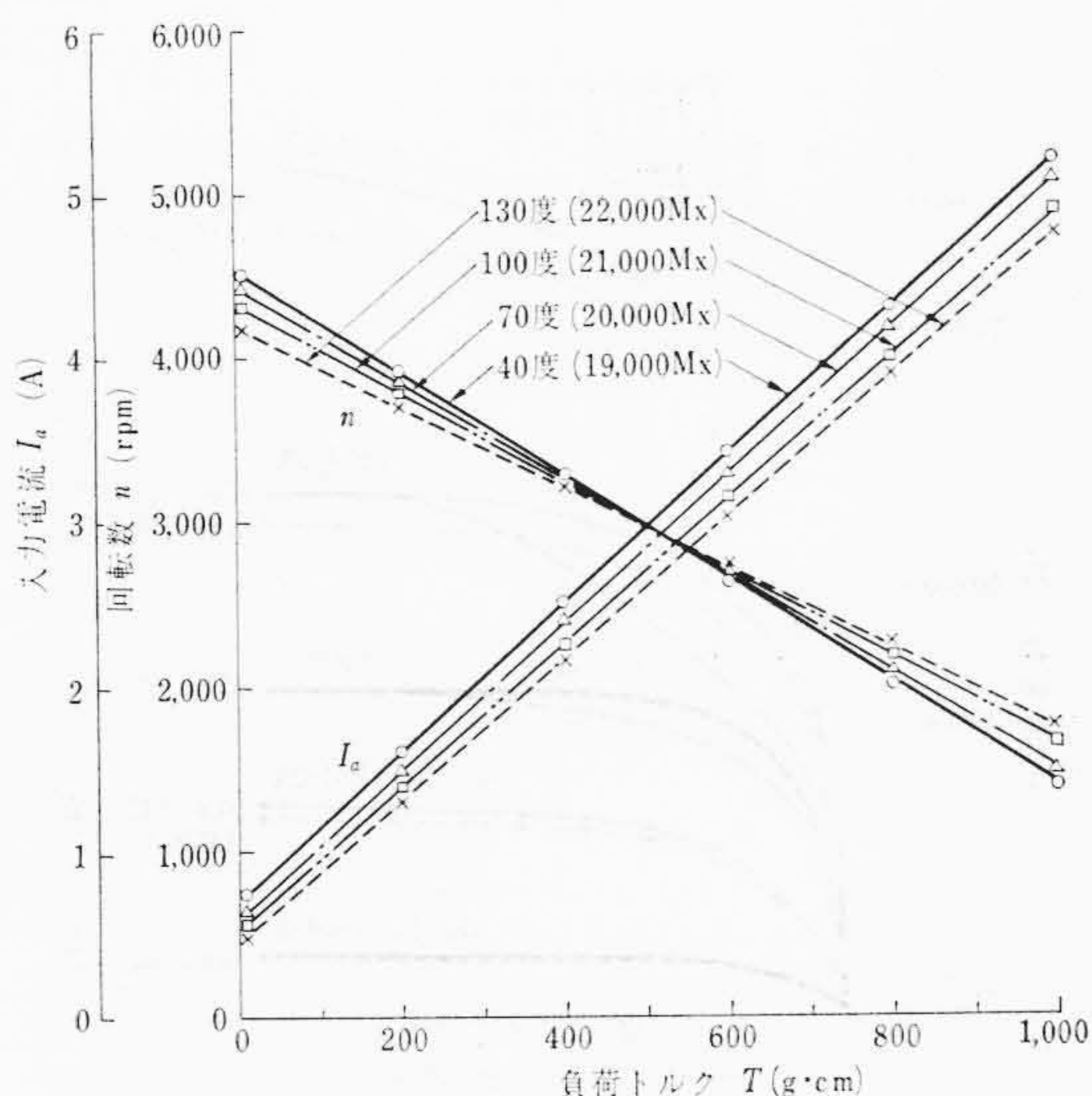
4.3.1 着磁角度と磁束の関係

着磁角度 θ_1 を種々かえて着磁した場合の着磁角と、有効磁束の関係を示したのが図 9 である。これよりモータ用磁石としてより大きな磁束を得るには、着磁角を広くする必要がある。しかし、小形マイクロモータのようにスロット数の少ないものでは、その磁束値は着磁角には関係なくほぼ一定である。磁束数は図 10 に示すようなアーマチャのセットされた状態の空げき磁束密度分布の面積で示すことができるが、有効磁束数はその全面積ではなく、アーマチャの巻線のピッチ角だけの面積で示される。よって、多スロットモータの場合のようにその角度の大きいものは、着磁角を広げて分布の幅を大きくして磁束をかせぐことができるが、マイクロモータの場合は、着磁角を広げても波形の極部のへこみと、分布波形の広がり部分が相殺されて、有効磁束は着磁角度に関係なくほぼ一定となる。

4.3.2 着磁角と磁束密度分布の関係

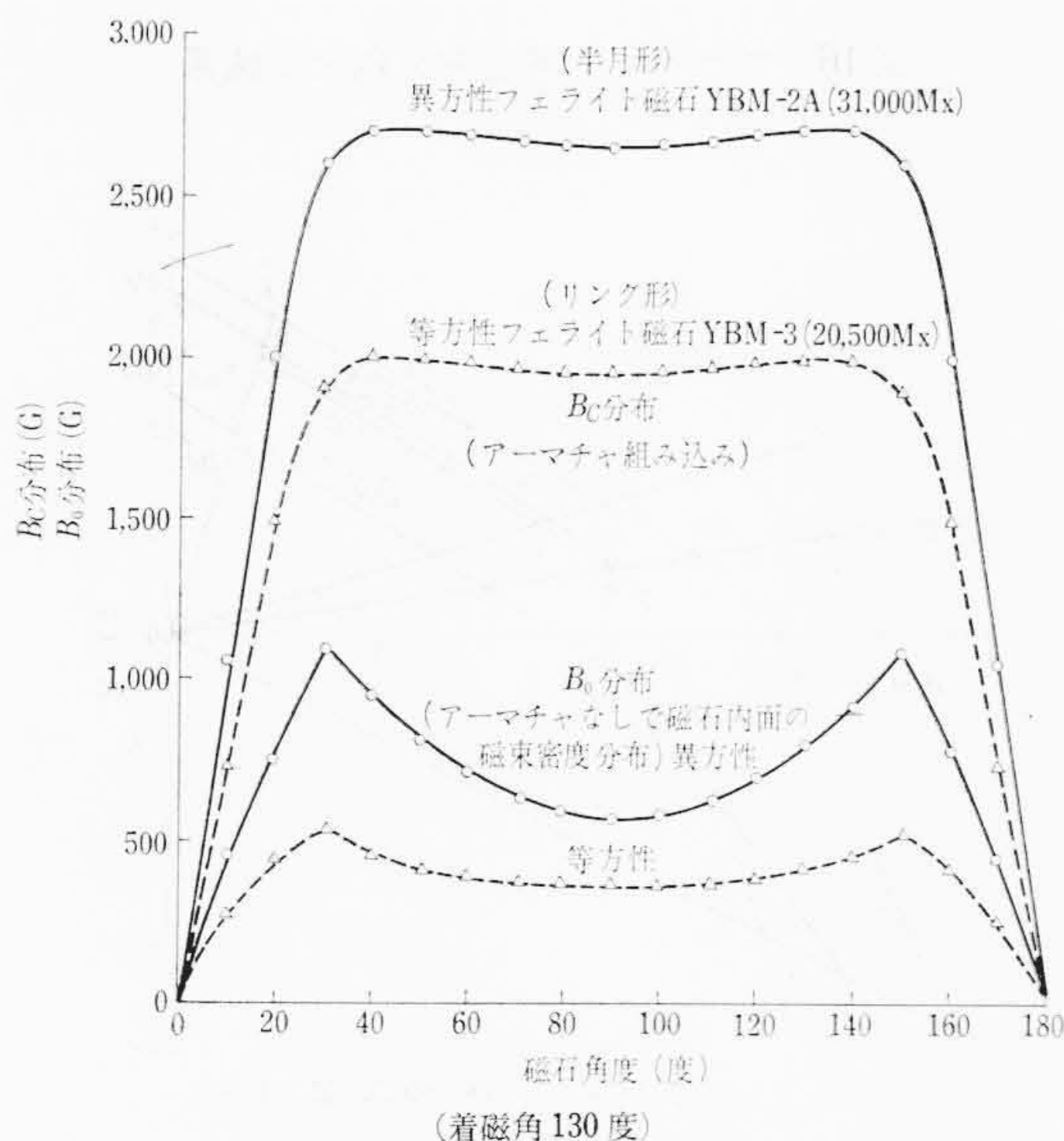
磁石の磁束密度分布として

B_c 分布: アーマチャを装着した状態で、磁石とアーマチャ間の空げき磁束密度分布を測定したものを図 10 に示す。 B_c 分布は、着磁角度を広くすると波形幅が広く



(50.8φ×40.3φ×25, YBM-3)

図 11 着磁角度とモータ特性の関係

図 12 B_0 , B_c 分布の比較

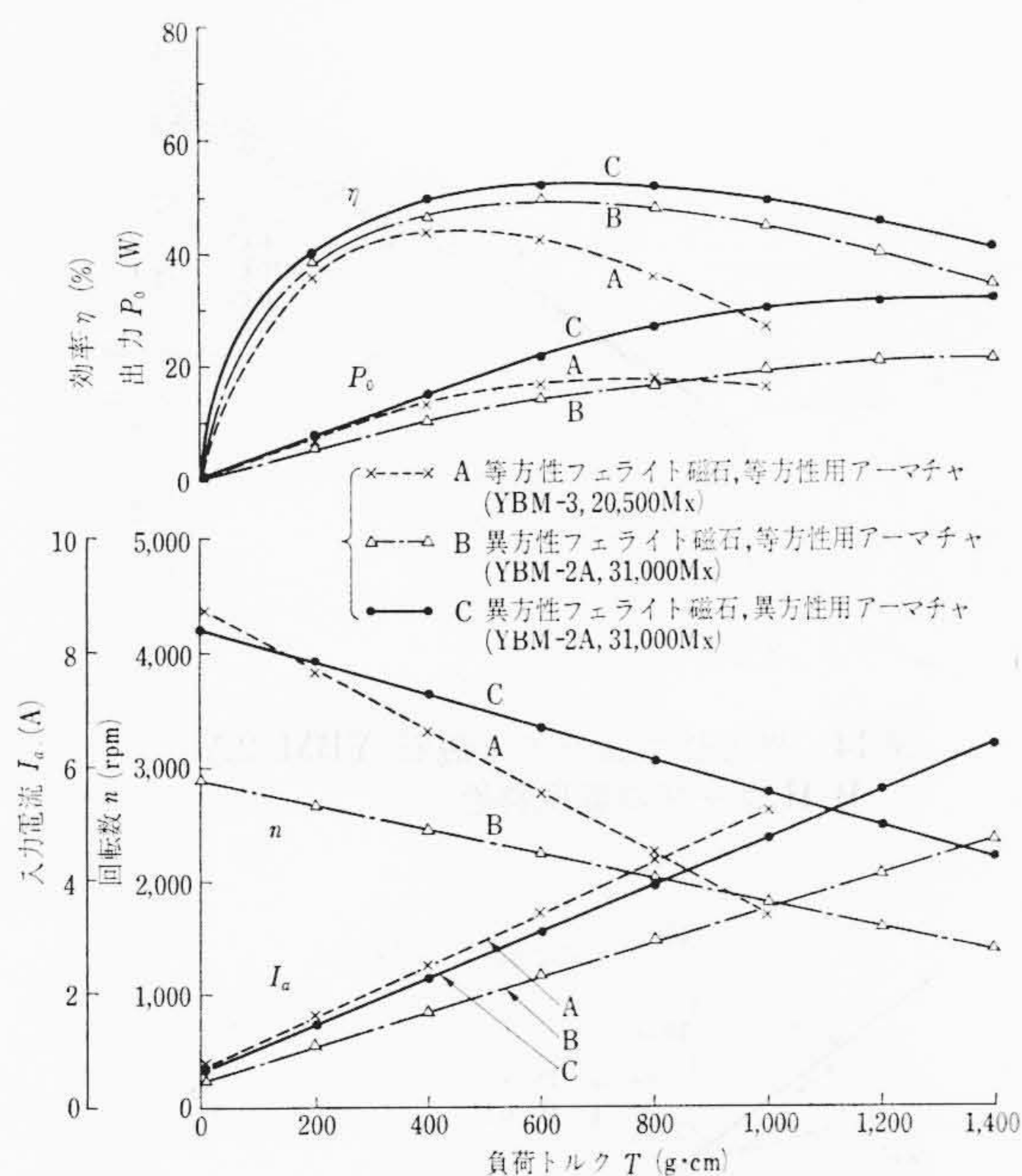
なり、極部分は磁束密度が低くなる。

4.4 着磁角度とモータ特性

着磁角度をかえた場合のモータ特性は図 11 に示すとおりである。モータ特性は、空けき磁束が大きいほど入力電流は全負荷を通して小さく、回転数は軽負荷では低く、重負荷になってもおちないという特性を示している。よって、消費電流を小さく押えるためには、着磁角度を大きくして磁束 Φ_g をできるだけ大きくとることが必要である。着磁コイル巻数を考慮して、着磁角は 130°~145° が最適である。小形マイクロモータのようにスロット数の少ないモータでは、着磁幅を広げると、磁氣的吸引力の影響により回転がなめらかでなくなり、起動電流の増加など、起動特性に悪い影響を及ぼすので着磁角を狭くすることが望ましい。

5. 異方性フェライト磁石の応用

現在、国内では電装用モータとしては、主として等方性フェライト磁石が生産されているが、欧米ではすでに、異方性フェライト磁石の使用が常識となっている。等方性磁石を用いたモータは、ワイパ、ブロワモータとして小中形の車種に限定されていたが、最近大形の車種にもフェライト磁石を使用する動きが出はじめ、高出力



(50.8φ×40.3φ×25, 160度半月形)

(磁石、アーマチャ形状寸法は等方性、異方性とも同一寸法)

図 13 異方性フェライト磁石を使用した場合のモータ特性

モータ用として長寿命、高信頼性かつ高磁束を有する異方性フェライト磁石の要求が強くなってきた。今まで異方性フェライト磁石は、技術的に問題があるのみならず、コスト的にも高いという難点があったが、日立金属株式会社熊谷工場においては、いろいろな問題点を解決してこの量産化に成功した。

以下、この異方性フェライト磁石を使用する場合に考慮すべき点、そのモータ特性などについて検討した結果を詳述する。

5.1 異方性磁石を用いた場合の諸特性

異方性フェライト磁石を使用した場合の諸特性について、等方性と比較して以下に示す。

5.1.1 磁気特性

図 5 に示したように、異方性フェライト磁石の動作点における磁束密度は、等方性の $Bd_3=1,850$ (G) に比べて YBM-2A では $Bd_2=2,500$ (G) で 35%、YBM-2C では $Bd_0=2,950$ (G) で約 60% 高くなる。

5.1.2 磁束密度分布

B_0 分布, B_c 分布を図 12 に示す。モータ特性は、アーマチャを装着した場合の空けきの磁束密度分布、すなわち、 B_c 分布により決まる。また有効磁束 Φ_g は、この B_c 分布の面積で表わされるが、異方性のほうが約 30~60% 向上する。なお、異方性磁石はリング形でも、半月形でも量産可能である。

5.1.3 モータ特性

異方性磁石と等方性磁石を用いた場合のモータ特性、および異方性用にアーマチャを設計した場合の特性を図 13 に示す。異方性磁石は等方性に比べ有効磁束が高くなるので、同一モータを使用した場合、回転数は下がり消費電流は全負荷を通じて大幅に減少する。次に異方性磁石用にアーマチャの設計を変更すると、モータ本体の大きさを変えずに出力、効率を大幅に向上させることができる。このように異方性フェライト磁石の使用により、モータの小形化、軽量化、コスト低減など等方性に比べて有利な点が多くある。中でも磁束の増加により、重負荷におけるパワーアップが可能となる。

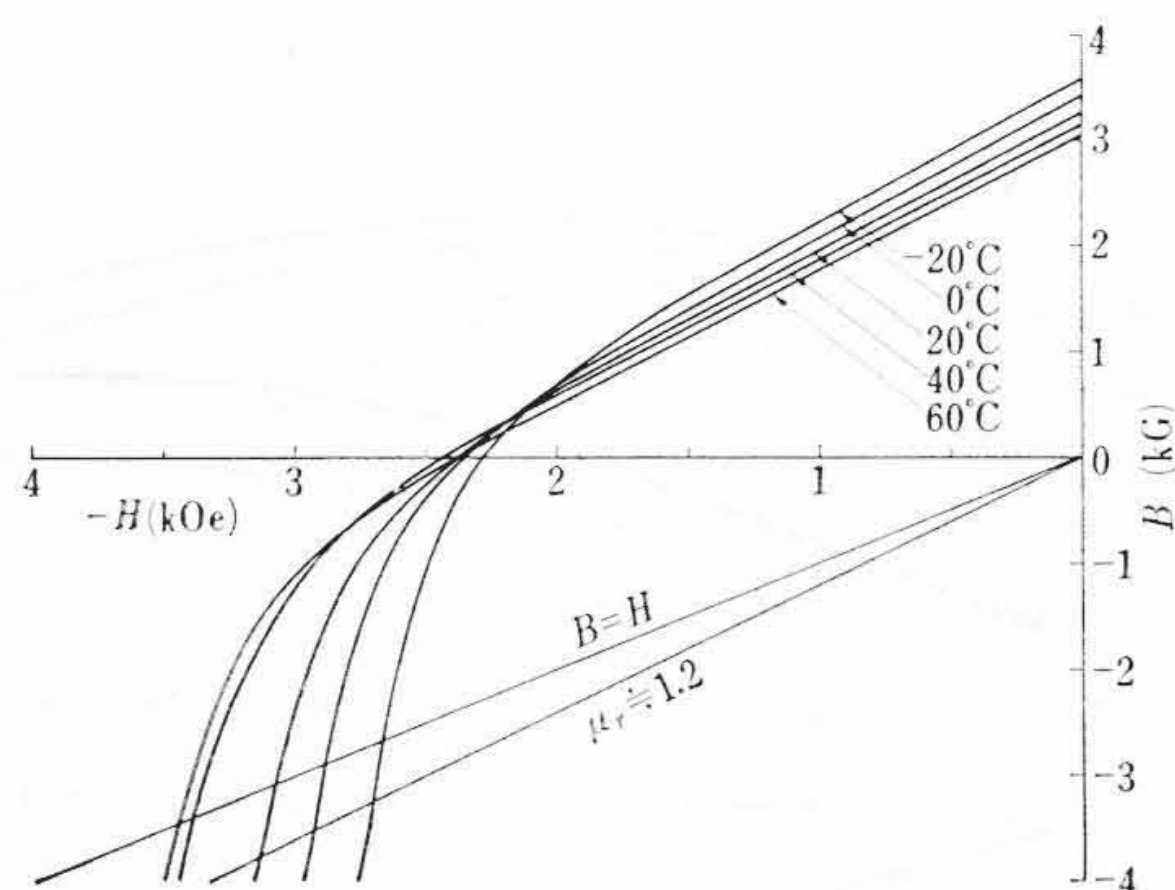


図14 異方性フェライト磁石(YBM-2A)のB-Hカーブの温度特性

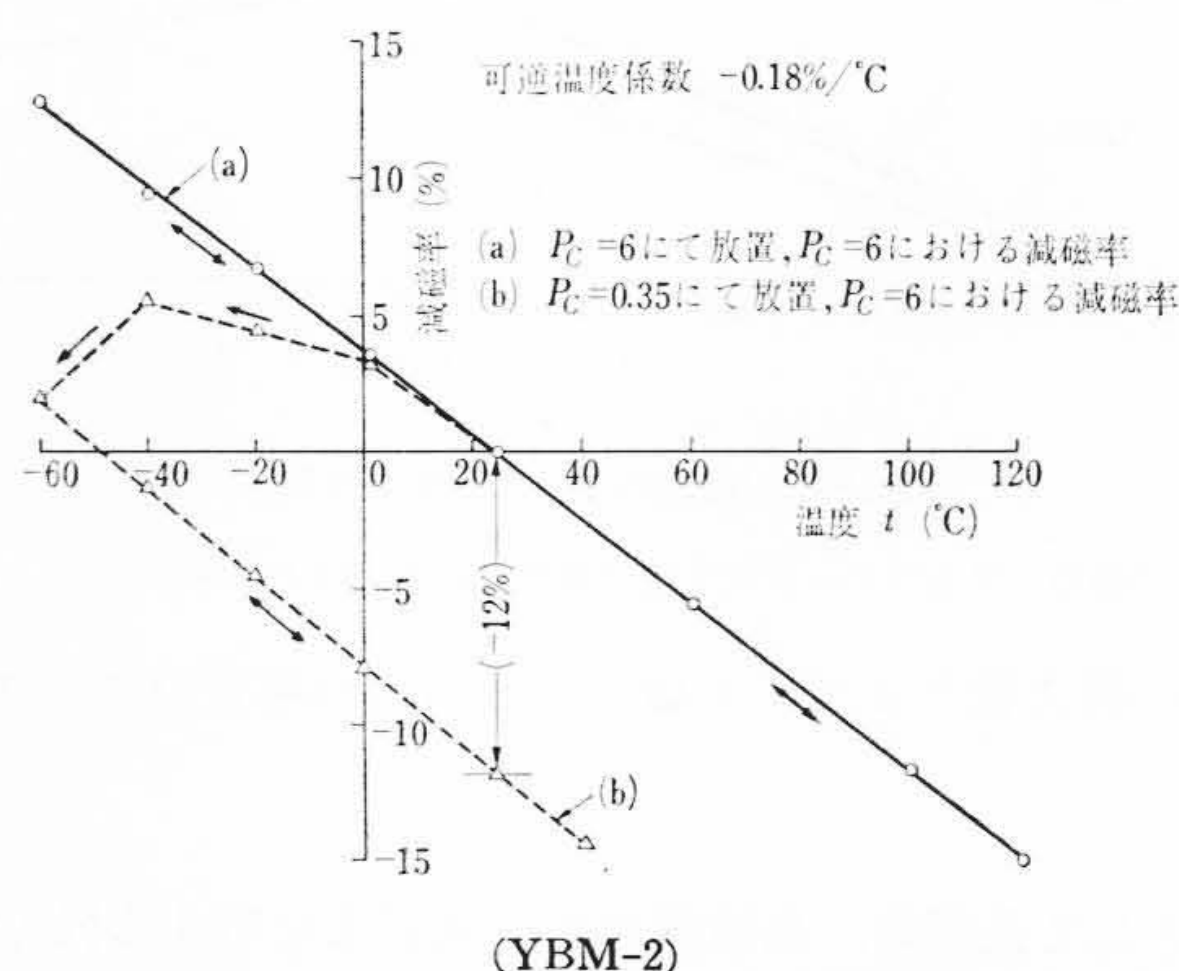


図15 異方性フェライト磁石の温度特性

5.1.4 温度特性

異方性フェライト磁石のB-Hカーブの温度特性および磁束の温度特性を図14および図15に示す。低温になると、B-Hカーブの曲折部が第2象限のパーミアンス係数の高いほうに上がってくる。ゆえに異方性磁石を低パーミアンスの状態では低温にすると、減磁の原因となる。その例が図15(b)の点線で示したものである。しかしモータの場合は、アーマチュアが組み込まれ、パーミアンス係数が上がった状態で使用されるので、実線で示したように -60°C 程度においても減磁は起こらず可逆変化する。また高温に対しては、不可逆変化は 200°C まではほとんど起こらない。このように異方性フェライト磁石は、等方性に比べ低温側の使用法を注意する必要がある。

5.2 異方性磁石を使用する場合の留意点

5.2.1 ブラケット厚み

等方性用ブラケットはプレス関係で、ほとんど 1.6 mm 厚さのものが用いられているが、異方性フェライト磁石を使用して、磁束が増加すると、これでは飽和するのでブラケットの肉厚を厚くする必要がある。各種の磁石につき、ブラケット厚みと有効磁束 Φ_g の関係を示すと図16のようになる。磁石が大きくなり、磁束が増すほど曲線のこう配は急になり、磁束を有効に利用するためには、ブラケットの厚みを厚くする必要がある。一般に、磁石のもつ磁束を有効に利用するためのブラケットの厚み T_b は、鉄の飽和磁束密度を $18,000\text{ (G)}$ として、近似的に次式で求めることができる⁽²⁾。

$$T_b = \frac{\Phi_m}{18,000 \times 2 \times W_m} \cdot k \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

Φ_m : 磁石の有する磁束 (Mx)

W_m : 磁石の軸方向長さ (cm)

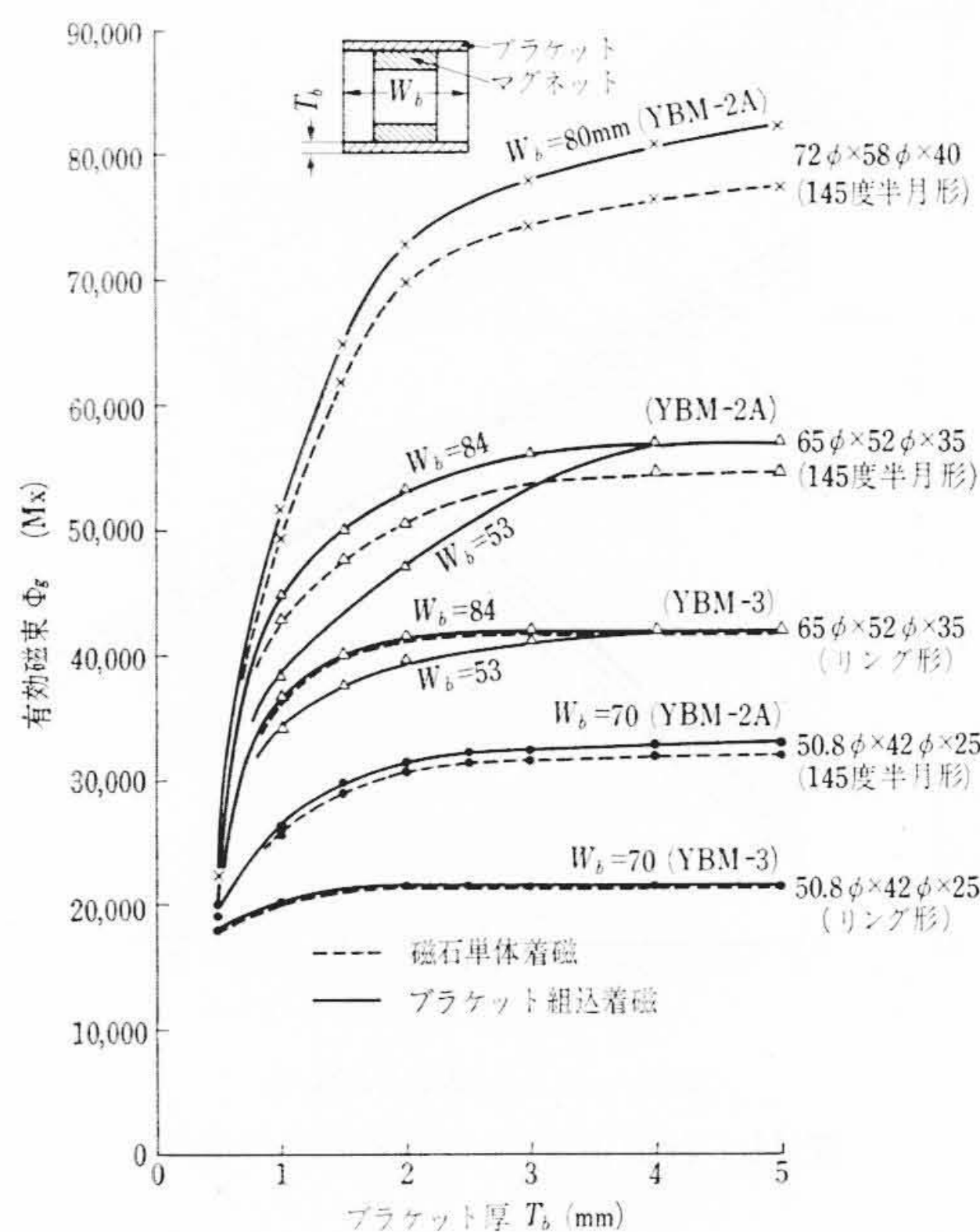
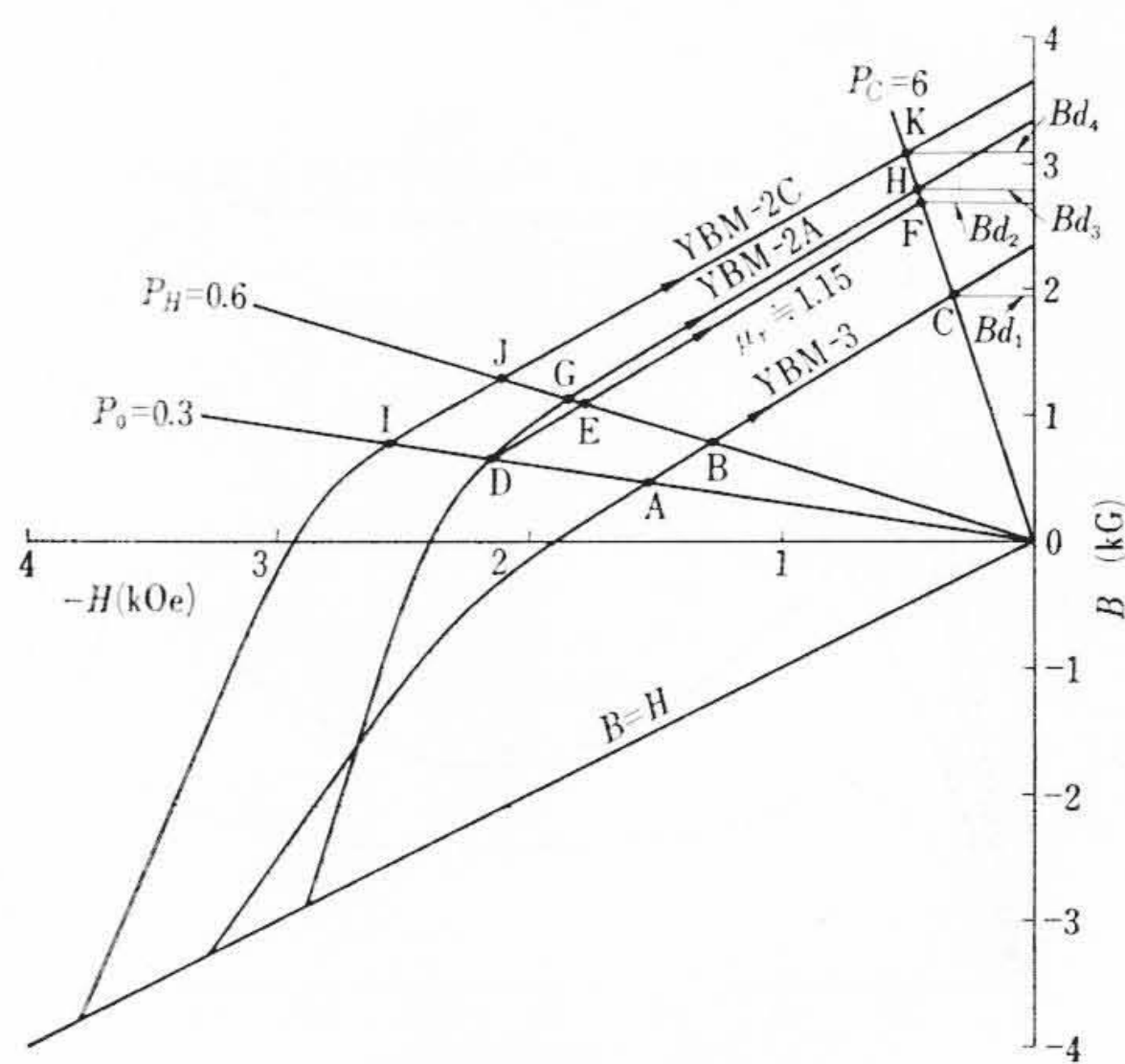


図16 ブラケット厚と有効磁束の関係



各パーミアンス係数は磁石形状 $50.8\phi \times 40.3\phi \times 25$ の場合

(磁石単体着磁と組込着磁)

図17 磁気回路的解析

k : ブラケットの軸方向の長さ W_b と磁石の軸方向の長さ W_m の比、 W_b/W_m により決まる定数($0.5 < k < 1.5$)

図16中の磁石形状 $65\phi \times 52\phi \times 35$ の場合について示すように、ブラケット長さ W_b の長いほど、磁束はブラケット厚みの薄いほうで早く飽和するので、定数 k は小さくなる。

5.2.2 磁気回路的問題 (マグネット単体着磁と組み込み着磁)

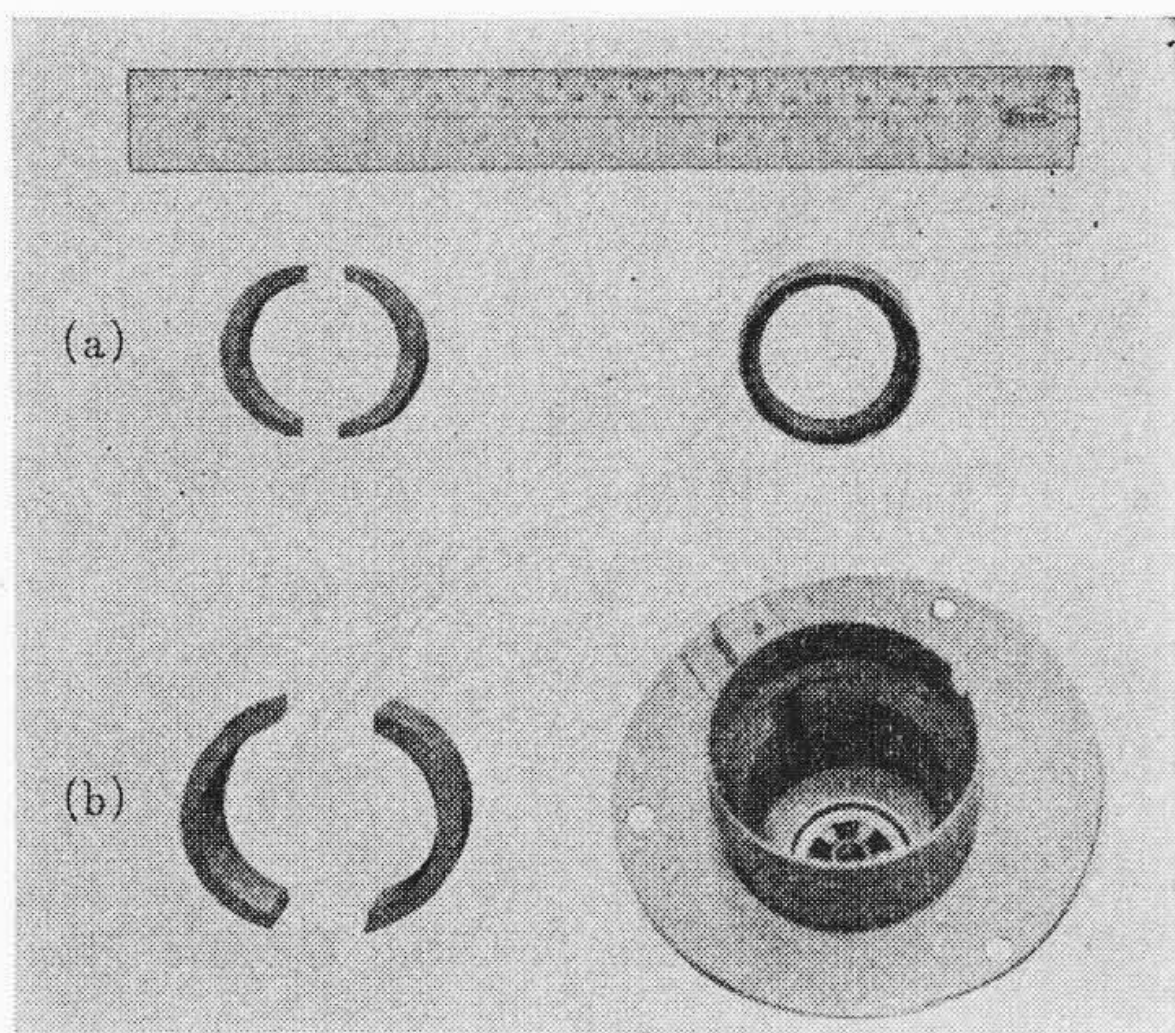
異方性磁石は、等方性と異なり第2象限の減磁曲線が直線ではなく、曲折点を有するので図16中の実線および点線の差にみるように、着磁をする際は、磁石単体よりはブラケットに組み込んでパーミアンス係数をあげて着磁したほうが、約5%有効磁束を高くすることができる。磁気回路的に等方性フェライトと2種類の異方性フェライトについて説明する。

磁石形状 $50.8\phi \times 40.2\phi \times 25$ を例にとると、各パーミアンス係数は図17に示すようになる。

ここに、

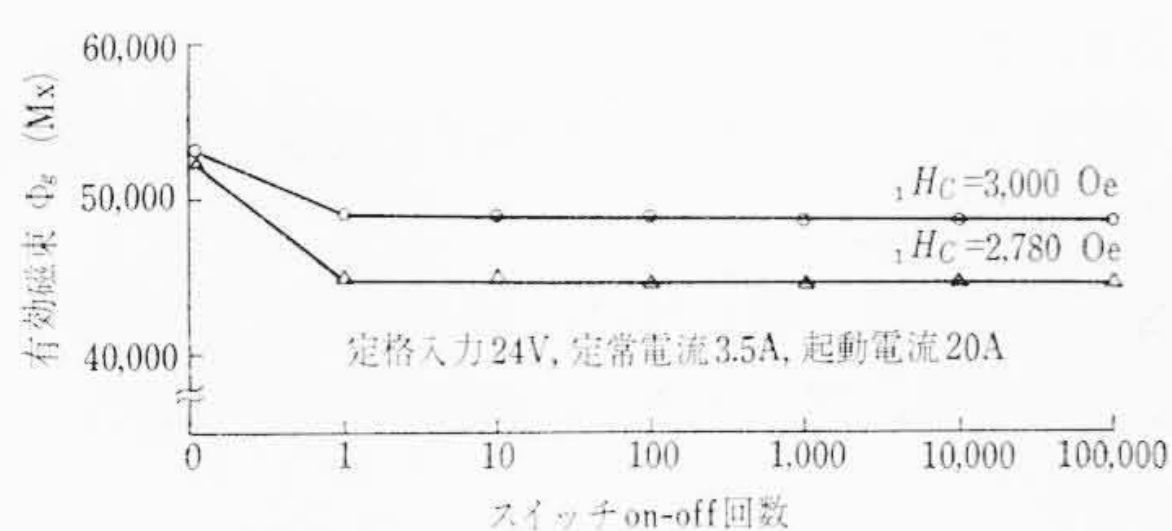
P_0 : 磁石単体のパーミアンス係数

P_H : 磁石をブラケットに組み込んだ状態のパーミアンス係数

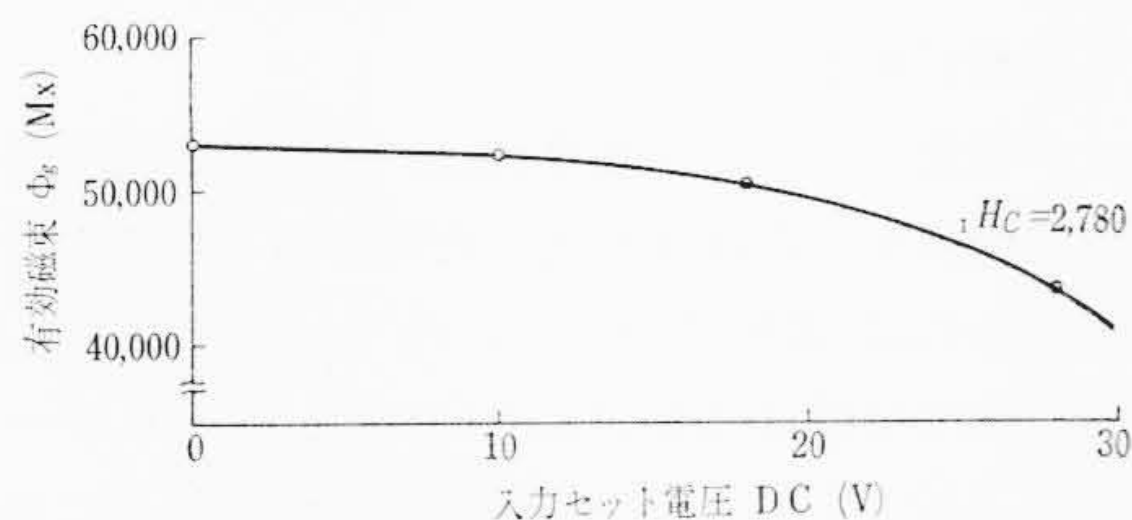


(a) 鉄板リングへのインジェクション⁽³⁾
(b) ブラケットへの接着

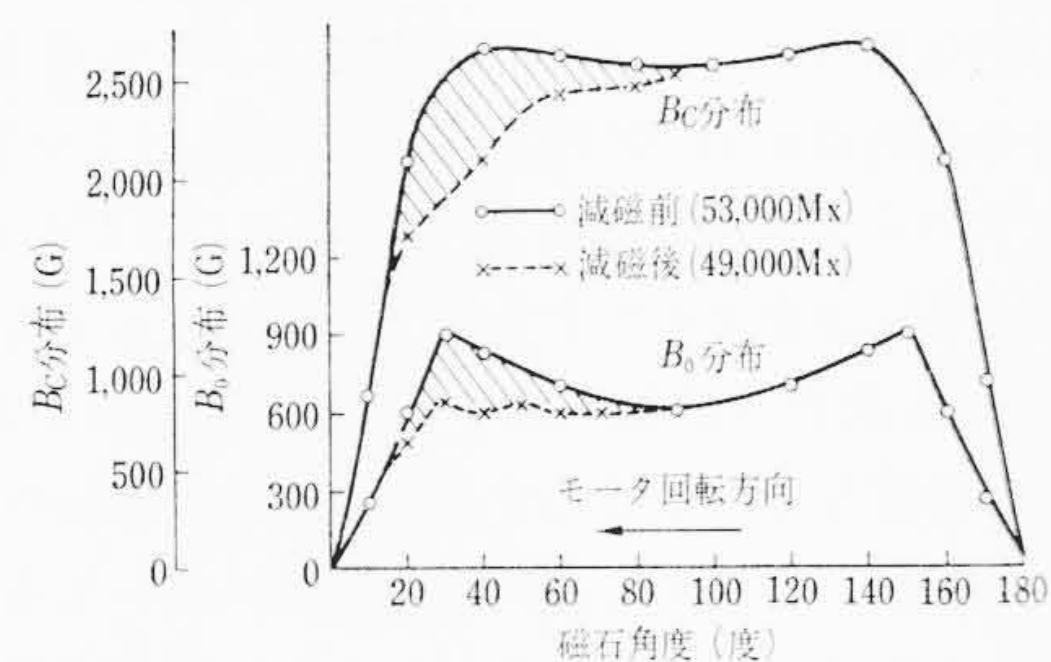
図 18 パーミアンス係数をあげる方法



(a) on-off回数と減磁量の関係



(b) 入力電圧とその電圧における10回on-off後の磁束(定格24V)



(c) 減磁による波形の変化

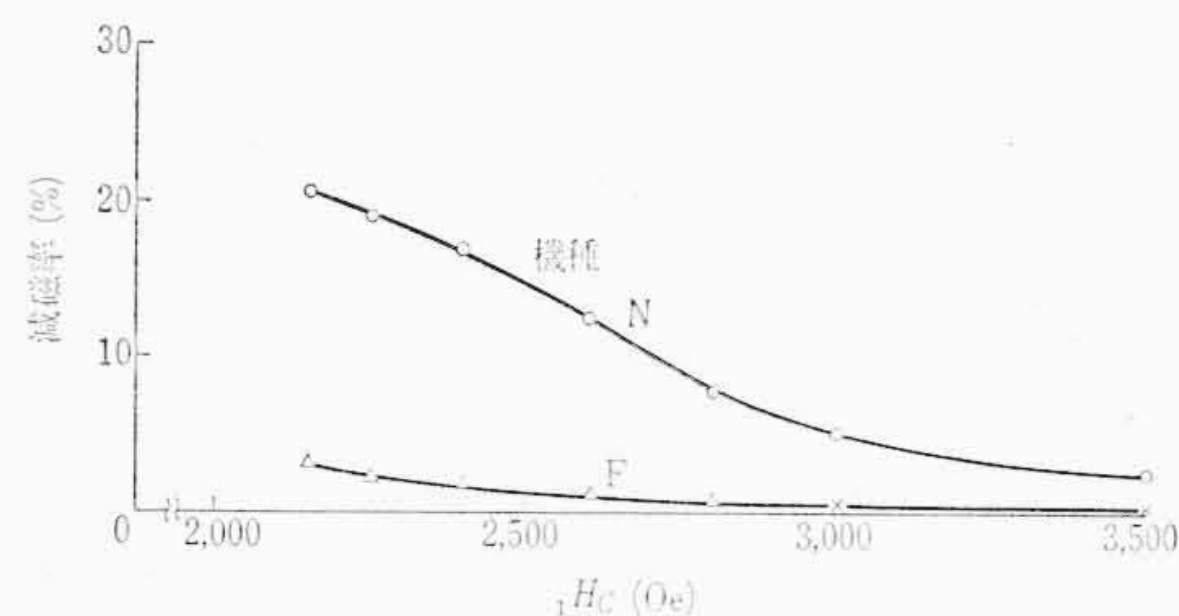
145° 半月形
(65φ×52φ×35, YBM-2A)

図 19 減磁界による減磁の諸現象

P_c : アーマチュアを装着した状態のパーミアンス係数

等方性フェライト磁石においては、磁石単体あるいはブラケット組み込みのいずれで着磁しても、アーマチュアを組み込むと可逆透磁率 $\mu_r \approx 1.15$ に沿って、 $\overrightarrow{ABC}$ と動作点が上がり、その動作点における磁束密度はいずれも Bd_1 となる。

しかし、YBM-2Aのように曲折点が P_0 より上にあるような異方性磁石では、磁石単体で着磁すると動作点はF点に、また、ブラケット組み込みで着磁するとH点になり、後者のほうが動作点における磁束密度で $Bd_3 - Bd_2 = 100$ (G) すなわち、約5%有利でこのような磁束は、ブラケット組み込みで着磁したほうが望ましい。そこでモータ用フェライト磁石としては、YAM-2Cのような磁気特性をもつもの、すなわち、 H_c が大きくかつ、曲折点が P_0 より下にある、B-H曲線は直線的であるものすなわち、 ${}_1H_c$ の高いものが望ましい。このような磁石を用いると、図からわか



(65φ×52φ×35, YBM-2A)

(定格入力電圧 DC 24 V における 10 回 on-off 後の減磁率)

図 20 ${}_1H_c$ と減磁率の関係

るように磁石単体、ブラケット組み込みの着磁のいかんを問わず、動作点は Bd_1 となり、温度特性、減磁の点からも望ましい。

このような観点から、日立金属株式会社熊谷工場では異方性フェライト磁石 (YBM-2A) については、磁石をブラケットに接着後、着磁を行なうかまたはインジェクションを行なって鉄板リングに磁石を固定後⁽³⁾、着磁して動作点を上げる方法を講じている。その例は図 18 に示すとおりである。

5.2.3 減磁界による影響および対策

モータが大形化してくると、その起動電流による減磁という問題が起こってくるが、その対策としては次のようなことがあげられる。

- (1) 磁石の ${}_1H_c$ を高くする。
- (2) 磁石の肉厚を厚くする。
- (3) 磁石内面にポールピースをつける。
- (4) 磁石の減磁しない範囲でモータ設計を行なう。
- (5) 起動電流を押えるような電気回路を設ける。

(1), (2) には限度があるので、出力の大きな磁石式モータの設計にあたっては、減磁に十分注意する必要がある。

モータの減磁について、その状態を示すと図 19 の (a) ~ (c) のようになる。すなわち、

- (1) 減磁は1回目の on-off で起こり、その後は安定である。
- (2) 減磁は電機子反作用により、磁石の半分に起こる。

この減磁に対して ${}_1H_c$ の大きさと減磁量の関係を示すと図 20 のように ${}_1H_c$ が高いほどその減磁量は少なくなる。

モータにおける磁石の減磁は、均一磁場による均一減磁ではないので、その定量的理論計算は今のところ困難であるが、次の 5.2.4 に示す均一磁界における均一減磁の場合の理論的算出方法により、どのくらいの減磁界がかかれば磁石は減磁するという、定性的な推定をつけることができる。

5.2.4 均一減磁界による均一減磁量の理論的計算

減磁界を論ずる場合には、 $4\pi I-H$ カーブで考察しなければならない。というのは、減磁界は磁石のもつ磁化の強さ $4\pi I$ に作用するものであり、われわれはその $4\pi I$ による B を測定しているからである。フェライト磁石の $4\pi I-H$ カーブは、B-H カーブより次式で求めることができる⁽⁴⁾。

$$B = 4\pi I + H \quad \text{ゆえに} \quad 4\pi I = B - H \quad \dots\dots\dots (8)$$

フェライト磁石の $4\pi I-H$ カーブは、図 21 の点線で示したようになる。

算出方法を図 21 の YBM-2A について説明すると、

- (1) 磁石形状および磁気回路より、そのパーミアンス係数 P_c を計算する。 P_c と B-H カーブの交点を A とする。その磁束密度を Bd_0 とすれば、有効空けき磁束は次式で求まる。

$$\Phi_{g0} = \frac{Bd_0 \cdot A_m}{f} \quad (\text{Mx}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

