

通信衛星搭載進行波管用磁石「ハイコレックス」

Rare-Earth Metal-Cobalt Magnet “HICOREX” Applied to Traveling Wave Tube of Telecommunication Satellite

高保磁力、高エネルギー積をもつ希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」は、まず時計用、ピックアップ用などの微小精密加工品で独自の市場を築いた。引き続いて、我々は高い逆磁界の作用する構造で、かつ高い安定性を要求される進行波管用周期磁界装置に用いるため、設計法と外乱に対する磁気特性の安定化法につき検討を加えてきた。

その結果、希土類金属コバルト磁石を用いることにより、従来の鑄造磁石を用いたものに比べ $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ に軽量化でき、かつ適当な熱的及び磁氣的安定化処理を行なうことにより、偏磁量の増加がなく、高温及び低温ふんい気並びに磁氣的接触及び機械的振動・衝撃に対し、従来のどの磁石材料より極めて安定な特性を得ることができた。更に10,000時間に及ぶ安定性試験の結果により、通信衛星搭載用進行波管にも使用できることが確認された。

川島富士男* *Kawashima Fujio*
原田英樹** *Harada Hideki*
滝本貞治** *Takimoto Sadaharu*
水原猛** *Mizuhara Takeshi*

1 緒言

進行波管は100MHz付近から100GHz付近までの周波数帯の電力を増幅する機能を持つマイクロ波電子管で、マイクロ波無線方式用をはじめとして、現在でもなお急速な需要の伸びを見せている。進行波管は機能上細長い棒状電子ビームを必要とするが、これの集束に初期には電磁石が用いられたが、永久磁石の発達によって永久磁石による周期磁界を用いるようになってから、地上のマイクロ波回線をはじめ、人工衛星搭載用に至る広い範囲にわたり利用されるようになった。この理由は、周期磁界装置の実用化によって小形化・高能率化され、本来持っている比較的簡単な構造で広い周波数帯域、高利得・高出力が得られ、信頼性の面でも極めて優れているという特長が十分に生かされるようになったからである。進行波管の利用範囲を更に拡大するには、出力・利得の増加、高周波数化、小形化及び軽量化が要求されるが、それには従来から最も多く使用されている鑄造磁石(アルニコ磁石)より特性の数段優れたものが必要であり、衛星搭載用進行波管においてその要求は最も切実なものになる。

我々は高エネルギーを持つ高級永久磁石として希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」に注目し、この特性の改善と衛星搭載進行波管用永久磁石として要求される種々の安定性について多くの検討を行ない、高エネルギー、低温度係数及び高安定性を持つ希土類金属コバルト磁石の実用化に成功した。

2 希土類金属コバルト磁石の特性

希土類金属コバルト磁石は、 $R-Co_5$ と一般に表わされる六方晶系の結晶構造を持つ永久磁石で、軽希土類金属を含む $R-Co_5$ は保持力及び飽和磁化が大きく、キュリー温度が高く、永久磁石材料としては理想的な材料である。ここ十数年の間各国で研究開発が精力的に行なわれ、その製造法は大別して、 $R-Co_5$ を単磁区程度の微粒子に粉碎し、C軸を一方向に整えて静水圧の超高压を用いるか¹⁾、焼結法²⁾によって密度を上げる方法、及びCuを加え非磁性相を析出させ、二相分離形磁石

表1 「ハイコレックス」の物理的特性 「ハイコレックス26」と「ハイコレックス13S」が「ハイコレックス18~22」と異なった物理特性を示しているのは、成分的に異なった組成からできているためである。

項 目 \ 材 質	ハイコレックス 18~22	ハイコレックス 26	ハイコレックス 13S
可逆透磁率 μ_{rev}	$\cong 1.0$	$\cong 1.0$	$\cong 1.0$
キュリー温度 $T_c(^{\circ}C)$	710	680	720
可逆温度係数 $\%/^{\circ}C$	-0.04	-0.05	-0.009~0.02
硬 さ Hv	~ 600	~ 600	~ 500
密 度 (g/cm^3)	8.3	8.1	8.4
電気抵抗 $R(\mu\Omega \cdot cm)$	50	50	50
抗折力 (kg/mm^2)	10~15	10~15	15~20

とする三つの方法がある。焼結法の製法による $R-Co_5$ の組成としては、主として $Sm-Co_5$ が用いられ工業化が進んでいる。希土類金属コバルト磁石は図1に示したように、他の永久磁石材料と比較して明らかなように、 $(BH)_{max}$, BH_c , H_c が大きい。これらの特徴を生かした応用は広範囲に及ぶが、特に進行波管周期磁界装置用として、大きな保磁力は極めて有効である。この磁石の物理的特性を表1に示した。

3 進行波管用周期磁界装置の軽量化

進行波管の構造は、電子ビームを打ち出す電子銃と電子ビームとの相互作用が行なわれるらせん回路及び使用済みの電子を集めるコレクタ部から成る。図2に示した進行波管周期磁界装置は、電子がらせん回路に衝突することなく、リップルの少ない一定の直径を保ちながら、らせん内を通過するよう電子ビームを集束するのに使用される。

電子ビーム集束の安定性を決める周期磁界の軸上磁界強度 B_m と周期 L について、RCA(Radio Corporation of America)のK.N.Chang³⁾らが詳細に検討しているが、進行波管の能率向上や出力増加のため電子ビームの電子密度を高くしたり、

* 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所 研究主任 ** 日立金属株式会社磁性材料研究所

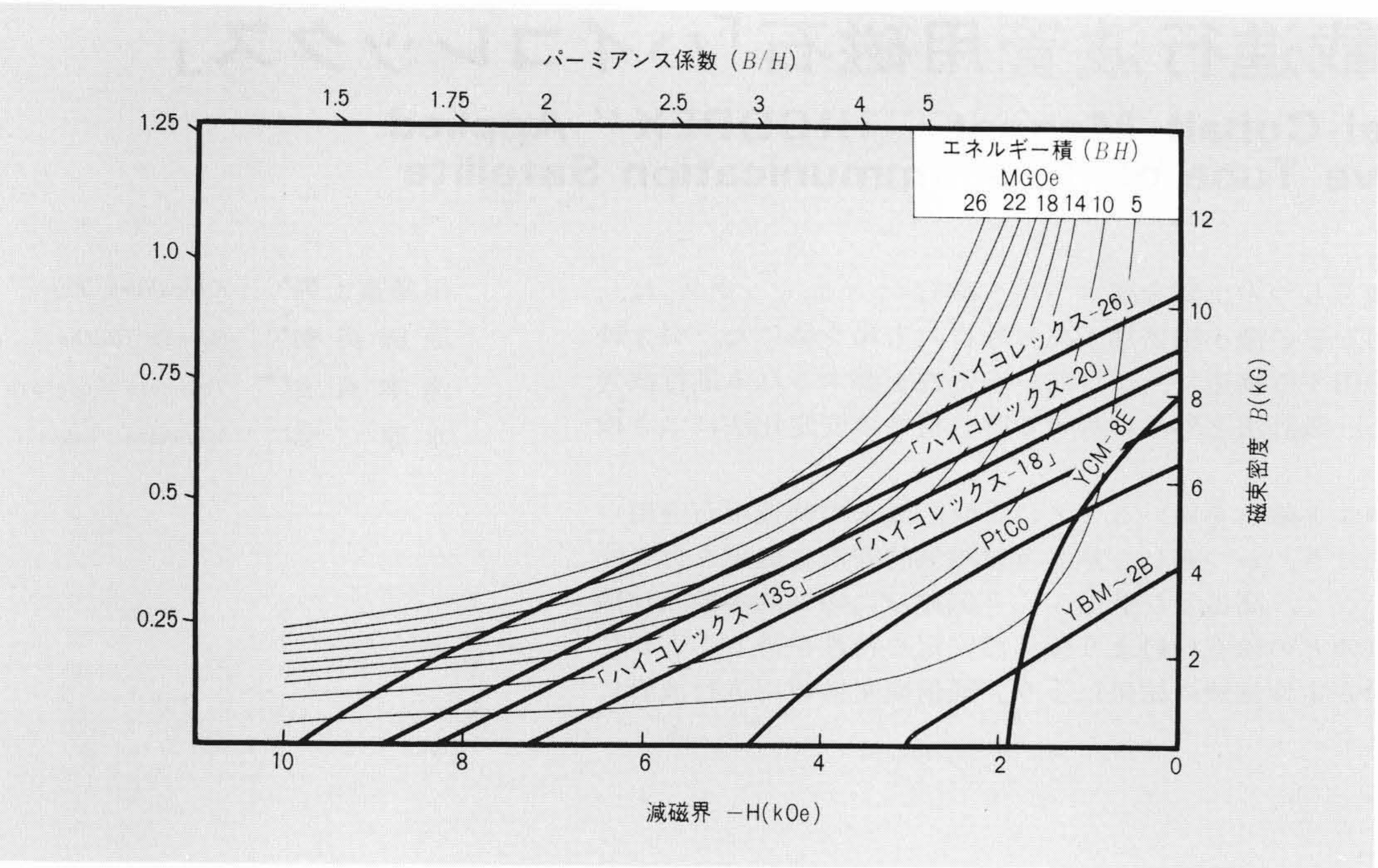


図1 各種永久磁石材料の磁気特性の比較 アルニコ磁石(YCM-8E)とフェライト磁石(YBM-2B), 白金コバルト磁石(PtCo), 希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」の(BH)減磁曲線を同一紙面で比較したものである。

増幅信号の周波数が高くなったりすると、一般的に B_m を大きくし、 L を小さくすることが必要で、これが高エネルギー磁石が要求される理由になっている。進行波管用周期磁界装置は、従来フェライト磁石が主流であったが、温度係数の小さい高保磁力のアルニコ磁石が生産されるにつれてアルニコ8系磁石が用いられ、進行波管の高性能化が可能になり特性は数段向上した。しかし、更に出力の増大や高周波数化、特性の向上、小形高能率化など新しい要求があり、その最も厳しいものが本稿で取り上げたような準ミリ波帯衛星搭載用進行波管(図3)である。衛星搭載のように極端な軽量化を要求される場合には、エネルギー積の大きい磁石が必要ばかりでなく、耐環境性と長寿命も要求される。これらを解決するには、希土類金属コバルト磁石(以下、Sm-Co磁石と表わし、日立金属株式会社製「ハイコレックス」を意味する)は最も適し

た磁石と言える。まず軽量化についての効果をみると⁴⁾、鋳造アルニコ磁石で設計されている製品について、Sm-Co磁石を用いて再設計した場合の寸法及び重量比を表2に示した。従来のアルニコ8系磁石からSm-Co磁石に変更したことによってその重量は1/5程度になり、大幅な軽量化が実現できた。

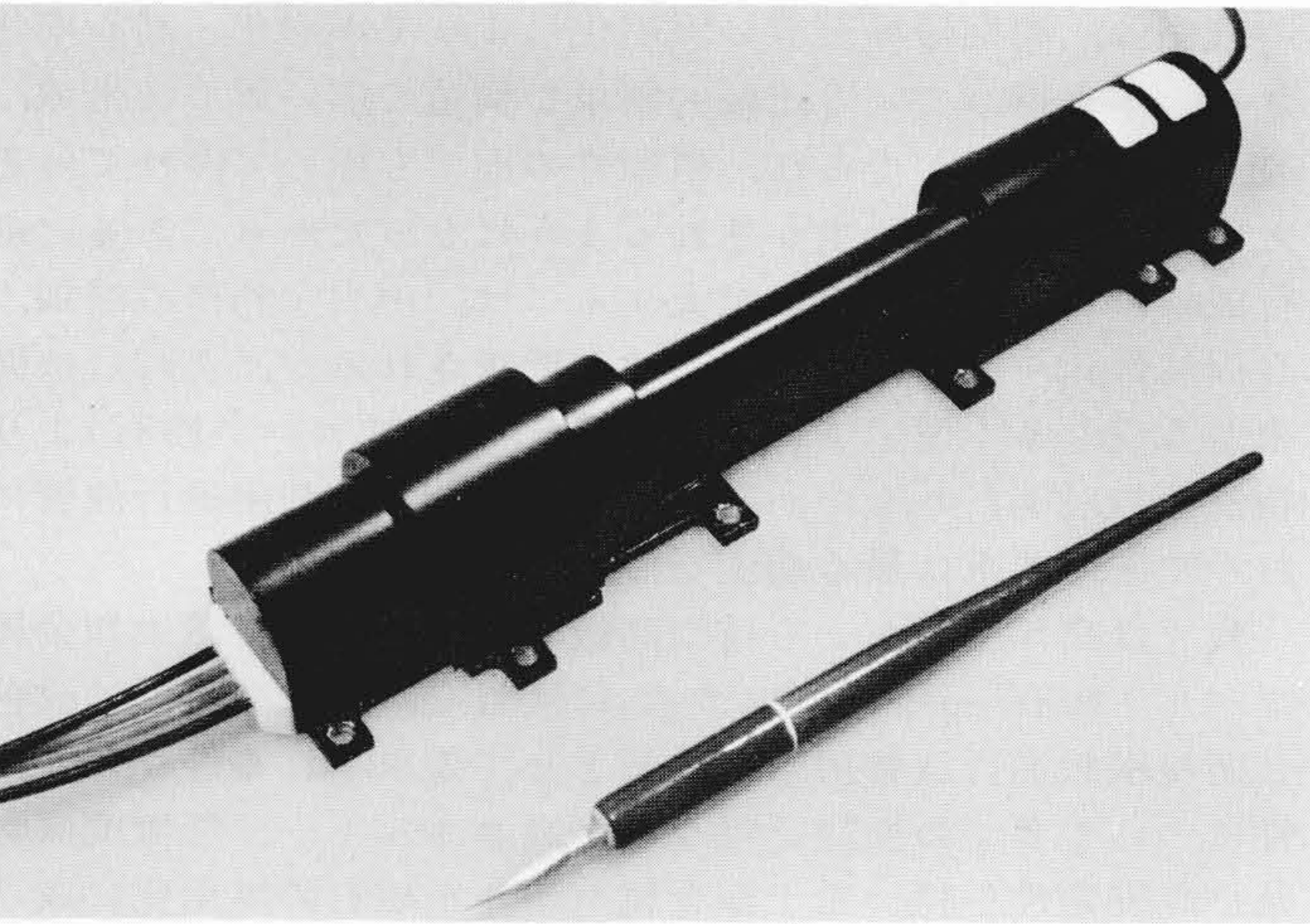


図3 準ミリ波帯衛星搭載用進行波管 通信衛星搭載用進行波管の外観で、準ミリ波帯域の電波に用いられる。

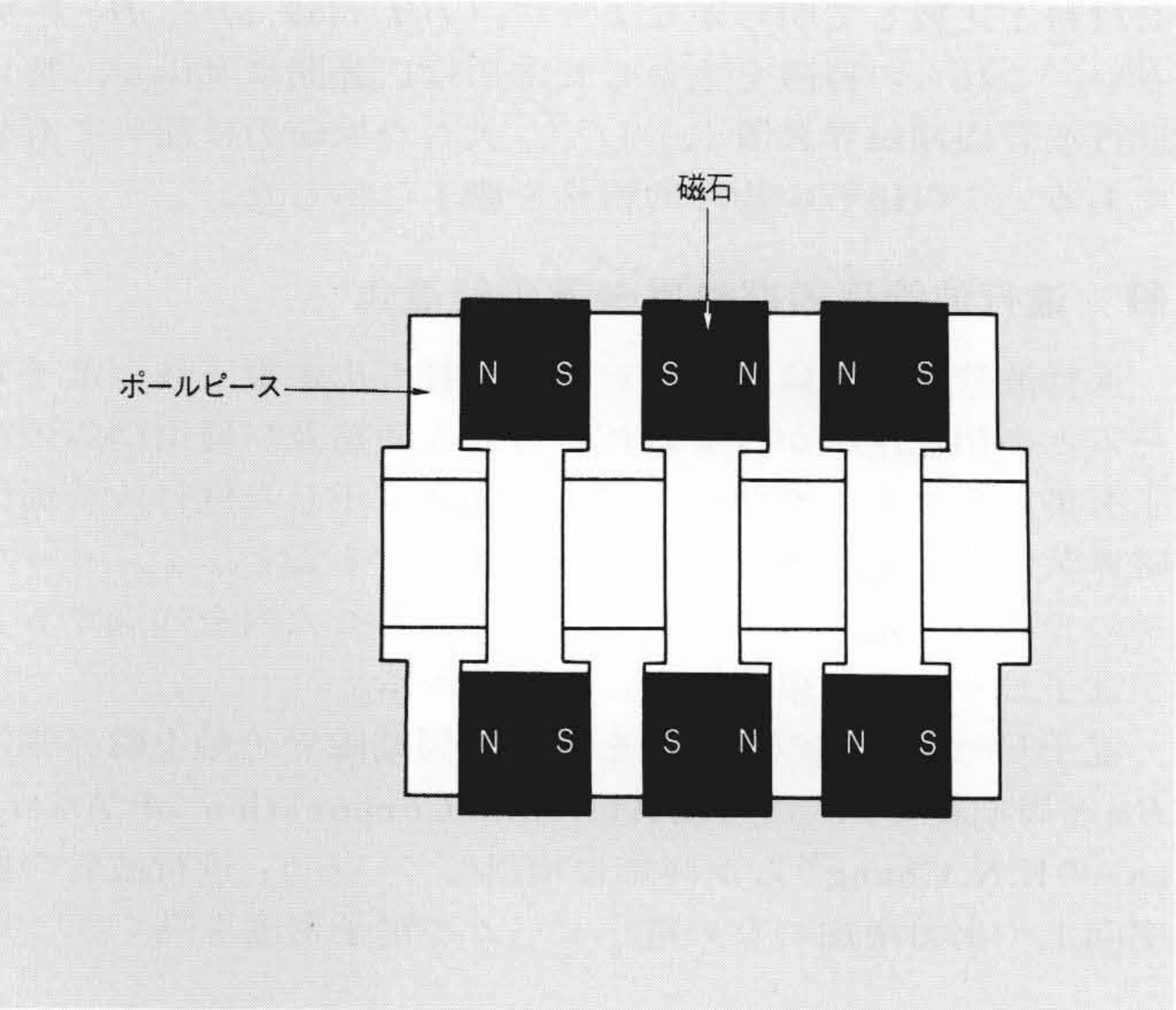


図2 進行波管周期磁界装置 リング状磁石をリング状ポールピースにはさみ、同極対向させた周期磁界装置の断面図を示す。

表2 希土類金属コバルト磁石による周期磁界装置軽量化の例 鋳造磁石で設計された周期磁界装置を希土類金属コバルト磁石によって重量比20%程度と大幅に軽量化した。

品 名	鋳造磁石 (YCM-8)		希土類金属コバルト磁石 「ハイコレックス」		重 量 比 (%) 「ハイコレックス」 アルニコ × 100
	マグネット寸法 (mm)	総重量 (g)	マグネット寸法	総重量 (g)	
試作1.	29φ×12φ×7	1,276	16φ×12φ×6.5	233.6	18.5
試作2.	24φ×9φ×6.3	432.4	12.5φ×9φ×4.5	84	19.4
試作3.	15φ×6.5φ×6	104.2	9.5φ×6.5φ×6	62.2	59.7
試作4.	32φ×9φ×6	484	13φ×9φ×6	101.1	20.9

4 温度特性の改善

衛星内での進行波管の温度は衛星によって異なるが、一般には $-20\sim+60^{\circ}\text{C}$ の範囲内で変化し、この範囲内で安定な動作と長寿命が要求される。そのためには温度による磁界強度の変化量、すなわち温度係数ができるだけ小さいことが望ましい。一般のSm-Co磁石の温度係数は $0.035\sim0.045\%/^{\circ}\text{C}$ であって、この値でも十分実用になり得るが、更に改善されることが望ましいことは言うまでもない。そのため、温度特性の改善の目標値を鑄造磁石において検討を行なうことにした。報告⁵⁾によると、Sm-CoにGd-Coを添加することによって温度特性を調節できるので、この方法によって温度特性を改善した場合の重量や安定性に対する影響を調べた。表3に温度係数と磁石重量について比較して示したように、温度特性の改善は電子ビーム集束の温度に対する安定性の改善をもたらすが、反面、エネルギー積の低下が起こり重量増加の原因となる。衛星搭載用の場合には、時によっては重量減少のほうが必要な場合もある。重量増加を抑えながら温度特性の改善を図るとすれば、与えられた条件を満たすために約 $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ 程度の値が適当と考えられ、後述するようにこれを安定性試験の対象の一つに選んだ。

5 安定性試験

衛星搭載進行波管は、衛星打上げ時及び宇宙環境での厳しい環境に耐えて、安定な動作が行なえることを要求される。そこで、磁石の十分な耐環境特性を持つことが必要である。耐環境特性として、(1)低温、又は高温に保持されても磁界強度の経時変化がないこと。(2)磁石を周期磁界装置として組み立てる場合や、進行波管と組合せ調整時に外部磁界や接触などによって減磁しないこと。(3)最大30 Gの振動及び 150 Gの衝撃に耐えることなどが合わせ要求される。アメリカでは、白金コバルト磁石が衛星搭載進行波管用として使用されている例があるが、我々の目的には十分な安定性を持っているものとして考えることができない⁶⁾。

一方、Sm-Co磁石は安定性が高いと言われているが、十分に確認されていないので、これについて(1)熱、(2)磁気接触、(3)衝撃、(4)振動に対する安定性について試験を行なうことにした。Sm-Co磁石の安定性については幾つかの報告^{7)~11)}があるが、今回検討の対象としている衛星打上げ時、及び静止軌道上での安定性などのデータとして用いるには不十分である。更に現在の希土類金属コバルト磁石の製造技術の向上により、それらの報告に比べはるかに安定になっていると思われるので、最適な安定化処理条件を求めることも含めて次に

表3 温度係数の相違による磁石寸法、及び重量の比較 希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」のSm成分をGdへ置換して、可逆温度係数をアルニコ並み、又は更に改善した場合の磁石総重量比を示した。

材 質	Sm-Co磁石	Gd-Sm-Co磁石	
最大エネルギー積 MGOe	18	13	10
温 度 係 数 $\%/^{\circ}\text{C}$	- 0.044	-0.02	- 0.009
周 期 磁 界 強 度 G	1,900	1,900	1,900
磁 界 周 期 (mm)	9	9	9
マグネット外径 (mmφ)	9~9.5	9.5~10	10~12
マグネット総重量 (g)	49.5	74	97
重 量 比	1	1.49	1.96

表4 一次試験の減磁条件 希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」を長期間1%以下の不可逆変化量で動作させる安定化条件を見いだすために行なった試験条件を定めた。

試験番号	減 磁 条 件	備 考
A	飽和着磁	材質：希土類金属コバルト磁石 「ハイコレックス-18」 Br : 8,300 G rH_c : 27,000 Oe (BH) max : 16.7 MGOe
B	5~10%直流減磁	
C	25~30%直流減磁	
D	5~10%熱減磁	
E	25~30%熱減磁	

表5 試験後の中心磁界変化率 温度安定性については10,000時間後、磁気接触については100回後の各減磁条件(表4参照)における不可逆変化量を示した。

試 験 項 目	水 準	減 磁 条 件				
		A	B	C	D	E
温度安定性	1. -40°C	0	0	0	0	0
	2. -20°C	-0.6	"	"	"	"
	3. 室温	-0.7	"	"	"	"
	4. $+100^{\circ}\text{C}$	-4.0	-0.3	+0.7	"	"
	5. $+200^{\circ}\text{C}$	-6.2	-1.3	+2.4	-0.3	"
磁 気 接 触	1. 磁石—磁石(反発)	-2.3	0	0	-0.1	-0.3
	2. 磁石—磁石(吸引)	-0.7	"	+0.4	0	+0.1
	3. 磁石—鉄板(スライド)	-0.2	"	0	"	0
	4. 磁石—鉄板(回転)	0	"	"	"	"
衝 撃 試 験	150 G, 3.5 ms	"	"	"	"	"
振 動 試 験	0.5~30 G, 5~2,000 Hz	-0.5	"	"	"	"

注：温度安定性 10,000 h, 磁気接触 100回, 単位(%)

述べる安定性試験を行なった。

(1) 一次安定性試験

Sm-Co磁石である「ハイコレックス-18」について安定処理の結果の一般的な傾向と最適安定化処理条件を求める。

(2) 二次安定化試験

概略最適処理条件で処理したSm-Co磁石「ハイコレックス-18」について長期安定性の追試を行ない、合わせて高温ふんい気での特性の検討を行なう。

(3) 三次安定性試験

温度特性を改善したGd-Sm-Co磁石「ハイコレックス13S」について(2)項で得た最適安定化処理を行なった場合の安定性を確認する。

試験用試料の材質、寸法は準ミリ波帯衛星搭載進行波管用磁石として使用するものを用い、減磁条件は一次試験では最適安定化処理条件が求められるように表4に示すように定めた。一次安定性試験はSm-Co磁石について表4、5に示した条件、項目及び水準で行なった。用意した試料は約500個で、ここから50個を抜き取り、磁気特性分布を測定した結果を図4に示した。

各試験の前後に、軸上磁界強度と偏磁量を測定して磁気的変化量を評価した。軸上磁界強度は磁石の中心軸上磁界のせん頭値を測定した。

また偏磁量は、軸上磁界強度の半径方向成分が同一半径の円周上でのばらつき量を言うのであるが、測定方法がないため、磁石の円周上の磁束のばらつきを測定して偏磁量として

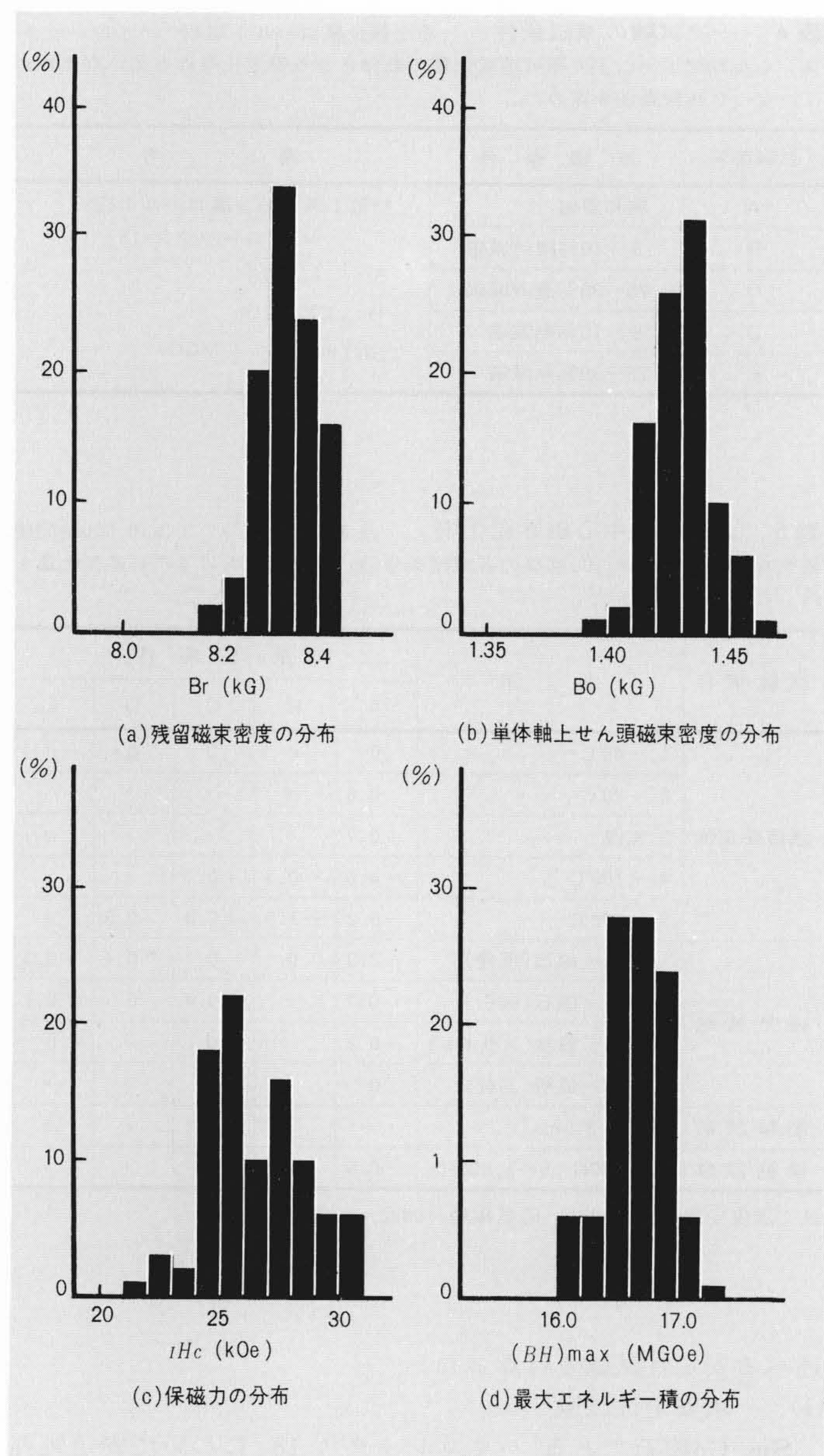


図4 安定性試験に用いた試料の磁力分布 安定性試験の測定は単体軸上せん頭磁束密度の変化量で行なった。

いる。回転する磁石の側面にホールプローブを当て円周上の磁界分布を測定し、1回転することによって得られる磁界強度の最大値と最小値の差を最大値で割った値を用いるか、差の $\frac{1}{2}$ を偏磁量として用いる。安定性に関する試験項目や試験条件は、衛星搭載用機器のための環境試験条件や進行波管の製造工程中における作業方法などを参考として決めた。

(1) 磁氣的接触

磁氣的接触は、(a)磁石と磁石を反発する方向に対向させて近づけ接触させる反発モード、(b)磁石と磁石が吸引し合っ接触しているのを引き離す吸引モード、(c)鉄片上を滑らせるスライドモード、(d)鉄片上をころがす回転モードについて行なう。

(2) 衝撃試験

試料の磁化方向に対し、平行及び垂直方向に各3回ずつ加速度150G、持続時間3.5msの衝撃を与える。

(3) 振動試験

試料の磁化方向に対し、平行及び垂直方向に各1回ずつ0.5～30G、5～2,000Hzの振動を与える。

(4) 熱安定性

−40℃、−20℃、室温、−100℃及び+200℃の各温度に保持し、磁界強度の経時変化を見る。磁界強度の測定は、すべて常温にもどして行なう。

6 試験結果

(1) 磁氣的接触安定性

磁氣的接触は製品の取扱い中頻繁に起こり、これに対する安定性は、製品の作業性向上に重要である。

Sm-Co磁石の磁気接触100回での試験結果は、飽和着磁のものは1～2%程度減磁するが、他の条件のものは全く問題なく安定であることが確認された。これは、フェライト磁石及び鋳造磁石が5～20%減磁するのに比較し優れた特長で、組立作業の改善に大きく寄与しよう。

(2) 振動・衝撃に対する安定性

衛星搭載用として使用する場合、打上げ時及び静止軌道投入時に経験するであろう振動・衝撃として考えられる0.5～30G、5～2,000Hzの振動と、150G35msの衝撃に対して、Sm-Co磁石は全く安定であることが明らかになった(表5参照)。

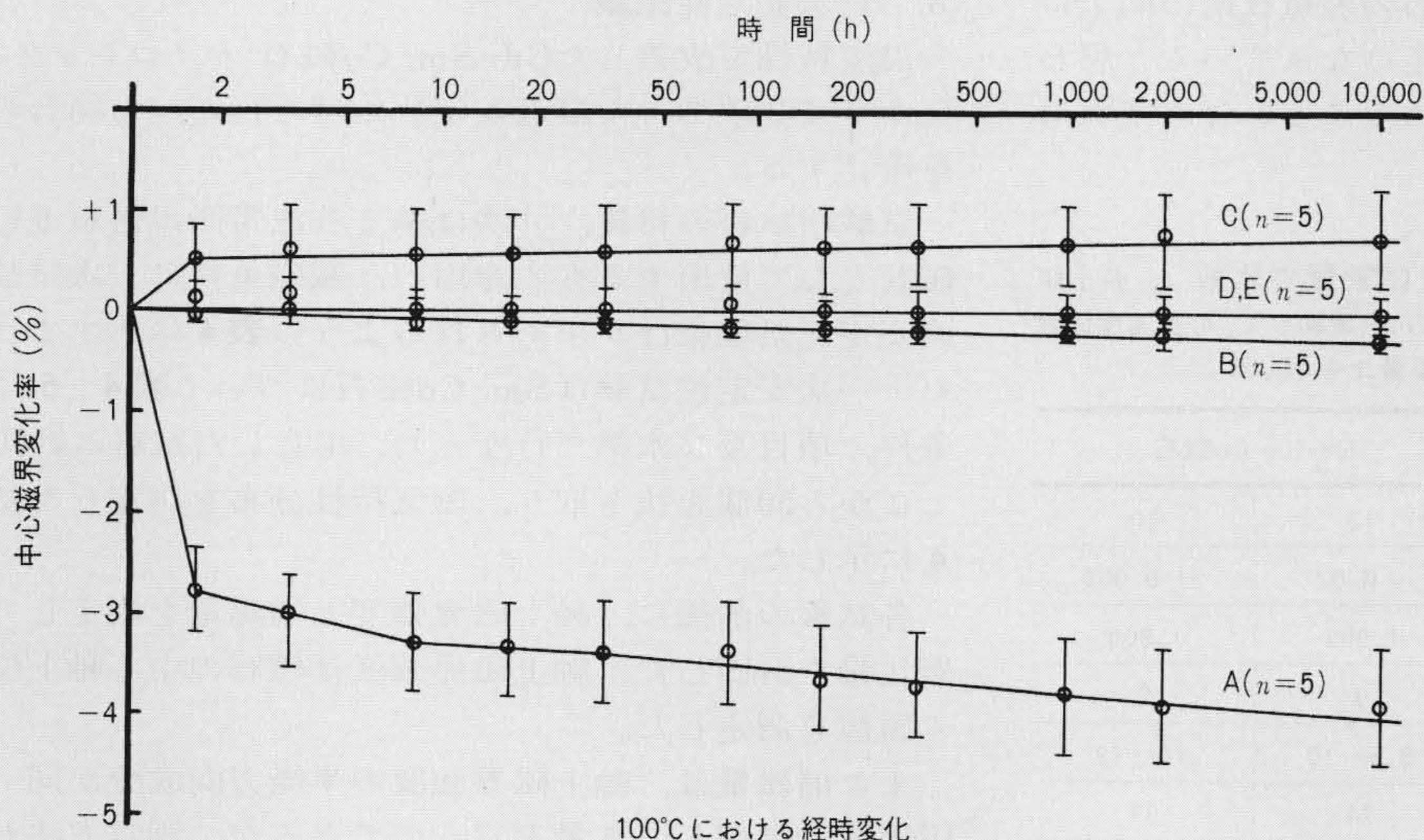


図5 100℃での経時変化 飽和着磁状態のままのものAは、3～4%の減磁を、過減磁Cしたものは1%程度の増磁傾向を示すが、他の安定化条件のものは全く磁氣的に安定である。

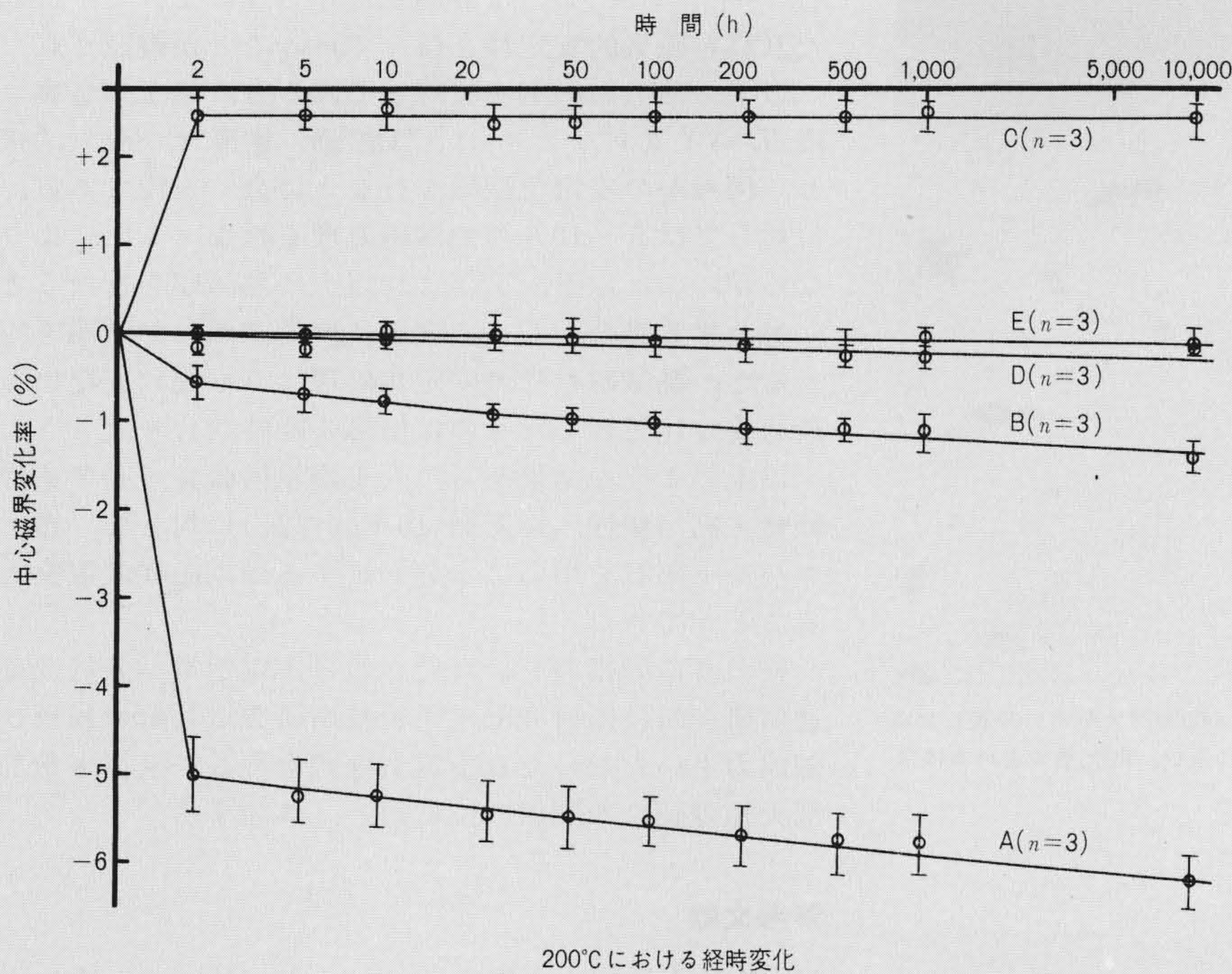


図6 200°Cでの経時変化
100°Cの経時変化の場合より飽和着磁品A, 過減磁品Cの経時変化量は1%程度増すが, B, D, E条件のものは磁氣的に安定である。

これらの結果によって、静止軌道上での使用温度が $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$ の範囲で、組立の際、数回磁石-磁石の反発モードを経験し、かつ打上げ時の振動・衝撃を考慮すると、減磁条件Dが進行波管の安定化処理条件として適していると考えられる。

(3) 熱安定性

-40°C から $+200^{\circ}\text{C}$ までの結果中、代表例を図5, 6に示す。同図中A~Eは各々表4に示した減磁条件を、 n は試料数を表わしている。 -40°C では、減磁条件にかかわらずいずれも安定であるが、 -20°C 及び室温で、Aは時間とともに磁界強度が減少し、10,000時間後には試験開始前に比べ0.6~0.7%程度低下していた。100°CではAの変化は更に顕著になり、10時間までの間に急激に低下し、その後は徐々に低下していく。直流減磁を行なったものについては減磁率の程度により変化は異なり、Bでは低下、Cでは上昇傾向が見られる。しかし、直流減磁を行なうだけでも、安定化減磁を行わない飽和着磁のままのものに比べ、熱に対して安定になっている。熱減磁を行なった試料については、試験温度によりはるかに高温で、安定化処理を行なっているため変化は起こらないが、安定化減磁を行っていないか、直流減磁だけを行なったA, B, Cのものは高温では低下している。Dは一度高温で安定化処理を行なったにもかかわらず、経時変化を示している。Eは変化していない。これらを総合して、100°CではD, E共に変化を起こさないことなどから、使用温度よりも約100°C高い温度で安定化処理する必要があると思われる。

しかし、データを詳細に検討すると、熱的外乱に対する安定性と磁氣的外乱に対する安定性を安定化処理の面から比べてみると、熱的安定化を実施したものは熱的外乱に強く、磁氣的安定化を行なったものは磁氣的外乱に強い傾向を示している。このことは安定化処理方法として、熱的処理と磁氣的処理を行なう必要があることを示している。更に安定化処理のための減磁を行なった場合、減磁方法のいかんにかかわらず偏磁量が増大する傾向があり、偏磁量を低く抑えるという観点からは安定化減磁量を必要最小限度に抑えることが望ましい。この点に立って安定化減磁を行なう場合の温度・逆磁

界の大きさを含めてデータを見直し、熱減磁と直流減磁とを合わせて行ない、減磁量は5~7%が適当であるとの結論に達した。

7 二次試験及び結果

この結論の正しいことを証明するために二次試験を計画し、表6のような減磁を行なって、耐環境性試験と低温・室温及び高温に保持した場合の磁氣特性の経時変化を調べた。またこれと並行して、250°C以上の高温に保持した場合の減磁の原因と対策についても調べた。

耐環境性は予想どおり極めて良く、直流減磁と熱減磁の効果がよく現われて、磁氣特性の変化は測定系の誤差の範囲内にあり、150°C保持の経時変化についても全く認められない。

250°C以上に保持した場合の磁界強度の減少の原因は、酸化の進行によるものであると予想されたが、300°Cに保ち 1×10^3 時間経過した磁石について調べてみると、磁石表面から酸化の進行が見られ、酸化した部分の体積と磁界強度、減少量とはほぼ比例しているとみることが出来る。図7に酸化部分の顕微鏡写真を示したが表面からの酸化の進行が認められる。

酸化による磁界強度の減少を防ぐには、表面からの酸化を防止すればよく、それには磁石表面をニッケル膜で覆うのも

表6 二次試験の減磁条件 一次試験で得られた知見から、最も磁石が温度に対して安定である条件を見いだすために熱減磁と直流減磁を並用して行なった試験条件を示す。

試験番号	減磁条件	試験番号	減磁条件
1	熱 5%	7	熱 3%+直流 7%
2	熱 7%	8	熱 5%+直流 5%
3	熱 10%	9	熱 7%+直流 3%
4	直流 5%	10	熱 2%+直流 5%
5	直流 7%	11	熱 5%+直流 3%
6	直流 10%	—	—

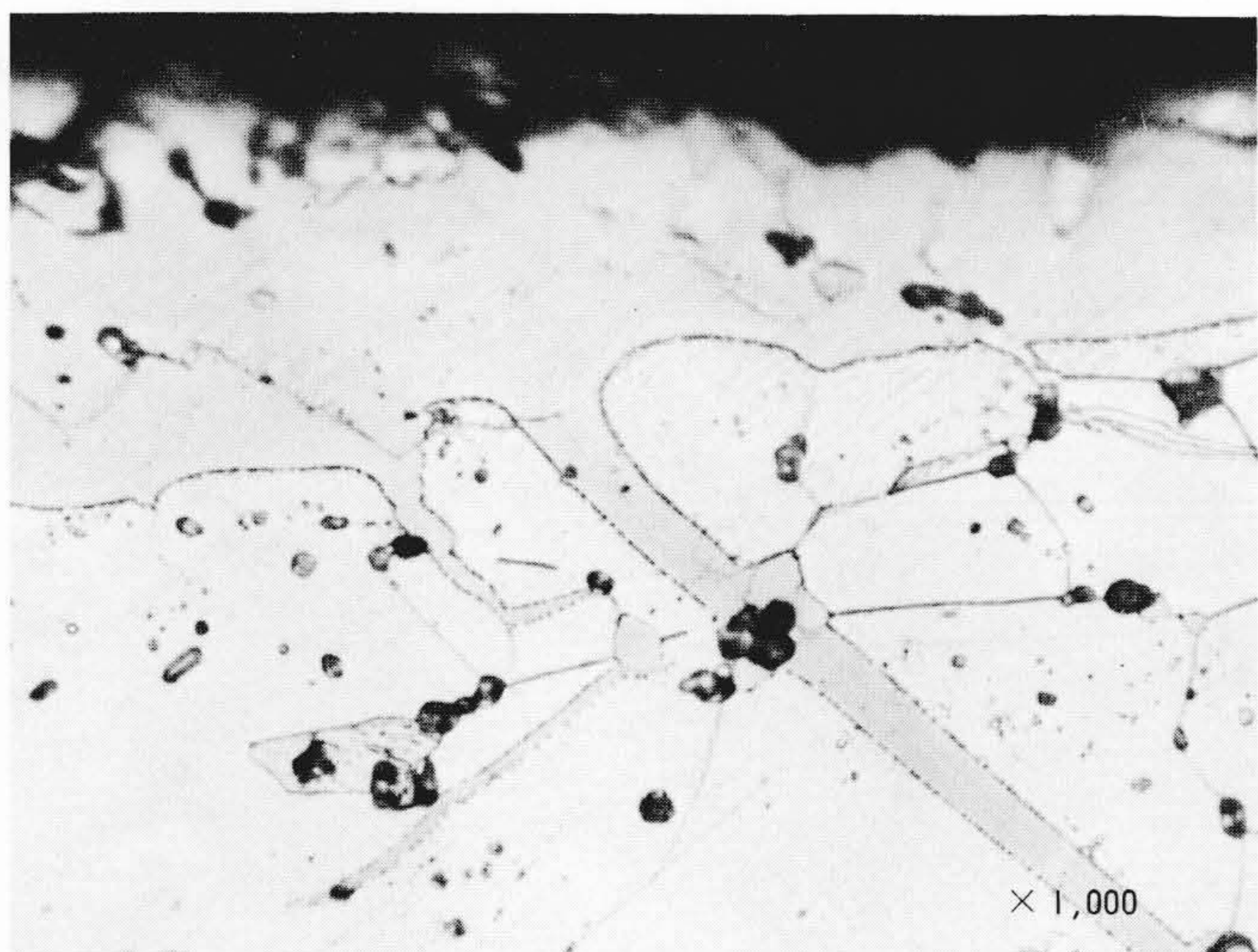


図7 酸化部分の顕微鏡写真 300°C×1,000時間大気中に放置した場合の表面の酸化層の顕微鏡写真を示す。厚さ25 μ に及び、酸化層の占める体積は4%であった。

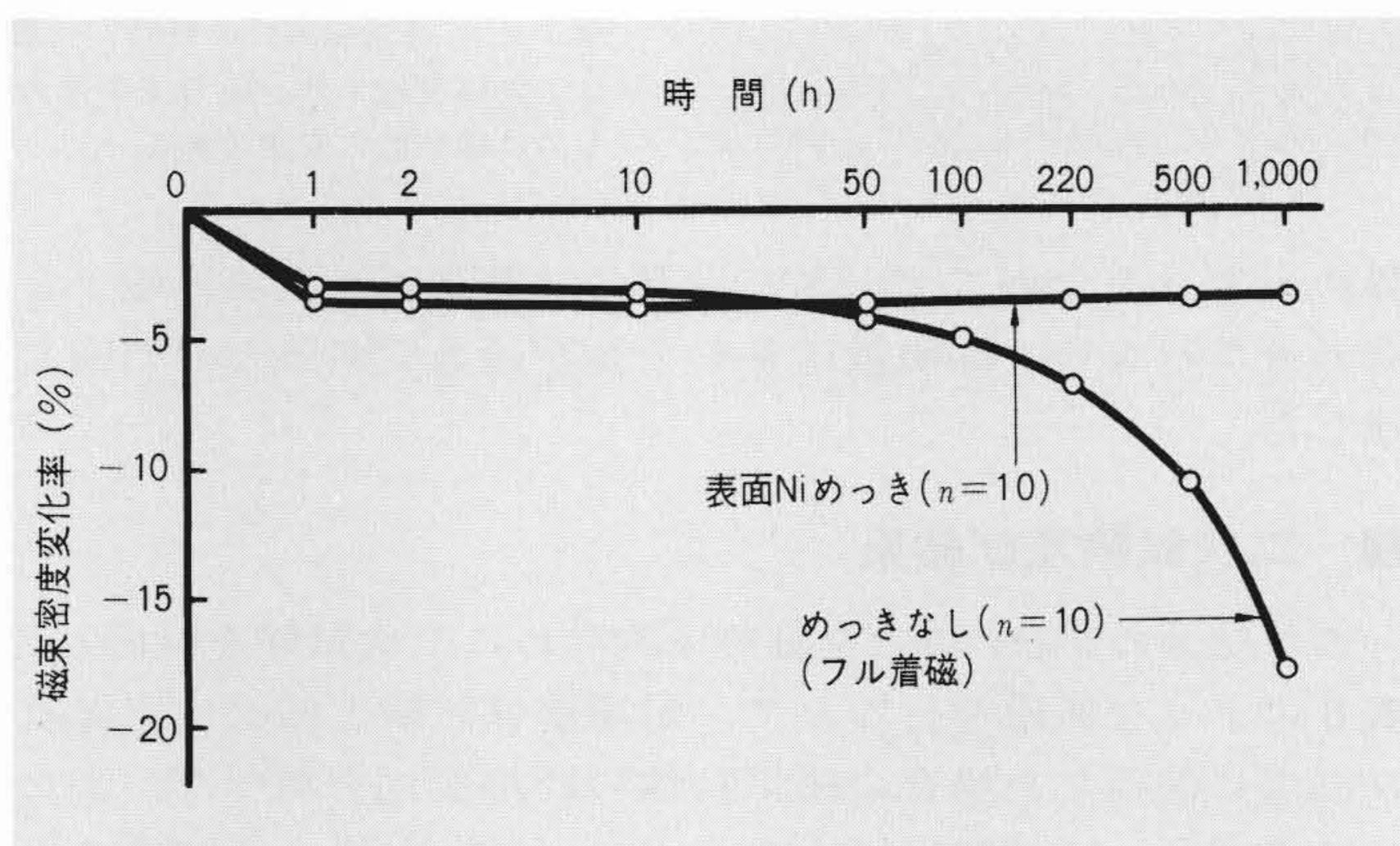


図8 300°Cの経時変化 酸化防止のため表面をNiめっき処理を行なった場合と表面処理を行なわない場合の比較を示す。

一方法で、図8に示した実験結果によると極めて有効であることが分かる。ただし、同図に用いた試料は安定化処理を行っていない。

8 温度特性を改善したSm-Co磁石の安定性

例えば、Sm-Co磁石にGd-Coを加えると温度特性が改善されるが、エネルギー積が減少するため同一磁界を作るためには磁石の重量が増加することは表3に示したとおりである。これを衛星搭載用として使用する場合には、重量の増加が問題にならない範囲で温度特性の改善が必要であるが、これらに関する一連の検討の結果からみて温度係数を $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ 前後にするのが最もよいと判断した。この程度の特徴のものは報告³⁾によれば、GdCo₅が重量比で約60%となり、 iH_c が増加して安定性は増加するか、又はSmCo₅の安定性と同じであろうと考えられるが、衛星搭載用としての性質上、最適減磁処理したものについて -50°C 及び -150°C に保持し経時変化を調べたが全く変化が認められなかった¹²⁾。

9 結 言

通信衛星搭載用準ミリ波進行波管の周期磁界装置を希土類金属コバルト磁石を用いて作ることを検討してきたが、衛星搭載に必要とされる環境・条件で、本希土類金属コバルト磁

石「ハイコレックス」は最適安定化処理によって、長期間にわたり高い磁氣的安定性を持っていることが確認された。

以上の検討の結果を整理してみると、希土類金属コバルト磁石「ハイコレックス」は、(1)振動、衝撃及び磁氣的接触に対し、何らかの安定化減磁を行なえば全く安定である。(2)温度に対しては5~10%の熱減磁処理を行なうことにより安定となるが、これ以下、又はこれ以上の熱減磁を行なうと安定性が劣化する場合がある。(3)更に直流減磁・熱減磁を組み合わせると、熱減磁だけの安定化処理よりも更に安定になる。(4)最適安定化処理したものは偏磁の経時変化を起こさない。

以上のような結果から、人工衛星搭載用の必要条件である軽量・高信頼性、長寿命(10年間保証)に対して、希土類金属コバルト磁石を用いて十分満足する周期磁界装置を実用化することができた。

終わりに御指導をいただいた日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所技術研究部電子管技術研究室井郷室長及び試験に御協力をいただいた日本電気株式会社電子装置事業部電子管部大類課長ほか関係各位に対し、感謝する。

参考文献

- 1) K.H.J. Bushow, W. Luiton et al: "Magnets Material with a (BH) max of 18.5 M·GOe", Philips Techn. Rev. 29 (1968)
- 2) M. G. Benz, D. L. Martin: "Cobalt-Samarium Permanent Magnets Prepared by Liquid Phase Sintering", Appl. Phys. Letters, 15 (1970)
- 3) K. N. Chang: "Periodic Magnetic Field Focusing for Low Noise Traveling-Wave-Tubes", RCA Review, Sep. (1955)
- 4) J. E. Grant, M. G. Benz: "2-kw Multioctave T.W.T Focused with Samarium Cobalt Magnets", IEEE, Trans. on Electron Device, Jan. (1972)
ラジアル周期磁界(铸造磁石)からアクシアル周期磁界へ希土類金属コバルト磁石を用いて設計変更した例が述べられている。
- 5) 徳永, 萩, 山川: 「Gd-Sm-Co系低温度係数材の開発」, 金属学会秋期大会(昭和49-11)
- 6) 川島, 菅原, 小峰: 「進行波管用周期磁界装置」, 磁性材料研究会資料(1973-11-27)
- 7) F. F. Westendrop: "Nonaging Cold-Pressed SnCo₅ Magnet", Magn. Vol. MAG-6 472 (1970)
- 8) D. K. Das: "Influence of Sintering Temperature on Magnetic Properties of Samarium-Cobalt Magnets", IEEE, Trans. Magn. 432 (1971)
- 9) K. J. Strant: Technical Report AFML-TR-73-46 (1973)
- 10) K. J. Strant: "Research to Investigate the Aging Characteristics of Samarium-Cobalt Magnets", Technical Report, AFML-TR-73-249 (1973)
これは温度に対する希土類金属コバルト磁石の磁気特性依存性について報告、また短時間の経時安定性試験が述べられている。
- 11) 川島, 菅原, 水原, 滝本: 「進行波管用希土類磁石の安定性I」, 電子通信学会, 昭和49年全国大会
Sm-Co磁石は熱減磁と直流減磁の両方を合わせて5~10%の安定化減磁を行なえば極めて安定し、衛星搭載進行波管用周期磁界装置に使用できる磁石であることを示している。
- 12) 川島, 水原: 「進行波管用希土類磁石の安定性(II)」, 電子通信学会, 昭和51年全国大会, No.219
磁束密度がアルニコ磁石の可逆温度係数にほぼ等しいGd-Sm-Co磁石について熱的安定性の検討を行なったことを述べている。