

スピノーダル型永久磁石合金の経年変化について

宮 本 毅 信*

Toshinobu Miyamoto : Magnetic Aftereffect on Spinodal Type of Permanent Magnet Alloys. Magnetic aftereffect was investigated for semi-columnar Alnico 5, columnar Alnico 5, columnar Alnico 8 and anisotropic Fe-Cr-Co alloys by a nuclear magnetic resonance method. The magnitude of the aftereffect was expressed by the amount of specific loss in remanent magnetic induction during one decade of time S_{10} . The referring time was taken at 10 sec after magnetizing. The magnetic aftereffect depends on the operating point, the temperature and the pre-stabilization by a DC pulse field. These results were compared with Néel's theory on the aftereffect.

(Received November 10, 1975)

I. 緒 言

スピノーダル型永久磁石合金は、比較的安定かつ高性能であるため、これまでも音響機器や計測機器などの電子部品の重要な基礎材料として多く利用されているが、最近ではその磁石の高性能化にとまらぬ、利用範囲がさらに広がってきている。その応用にあって重要となるのは、使用される条件のもとで永久磁石の磁化がどの程度に安定かということである。

着磁された永久磁石の磁化の強さは、外部磁界が0でも時間とともにゆっくりと低下する。この時間的な変化は経年変化とよばれ、その程度は磁石のおかれる温度および磁界(外部磁界と内部反磁界)に依存することが知られている。マルテンサイト型の磁石合金では、炭素原子の拡散がその経年変化を左右するといわれているが、スピノーダル型永久磁石合金では、その経年変化はスピンの熱ゆらぎによる磁化の反転がその主因であると解釈されている⁽¹⁾⁽²⁾。したがって、温度が高くなると経年変化はしだいに大きくなるが、経年変化した材料を再着磁すると、その磁化の強さは元の値に復元しうる。ところがスピノーダル型永久磁石合金ではある温度(たとえば Alnico 合金では 550°C)以上になると、さらに別のタイプの減磁が含まれるようになる。これは原子の拡散により析出組織が変化するためにおこるもので「永久減磁」と呼んで区別する。この永久減磁の部分は再着磁しても復元することができない。本報告では -20~50°C 付近における経年変化に注目し、永久減磁については取扱わない。

スピノーダル型永久磁石合金は、高性能磁石として広く実用されており、その経年変化については、これまで主として Alnico 5 系について詳細に報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしながら最近では、柱状晶技術の進歩によってアルニコの柱状晶材料が実用化されるようになり、その磁石特性はさら

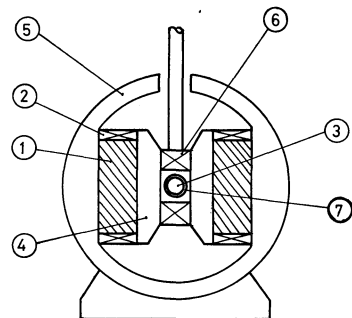
に向上している。またアルニコに匹敵する磁石特性をもつ塑性加工可能な Fe-Cr-Co 系合金磁石も新しく開発された⁽⁵⁾。そこで、本論文ではスピノーダル型永久磁石合金の中で最も高性能の現用材料である柱状晶 Alnico および Fe-Cr-Co 合金磁石についてその経年変化を詳細に検討した。

II. 実験方法

これまでの多くの研究では、磁石材料の経年変化は棒状または回転楕円体の試料を用い、マグネットメータや高感度磁束計により測定されている。本研究ではもっと詳細に、その経年変化を測定するために核磁気共鳴(NMR)法を採用した。

1. 測定方法

Fig.1 に示すようなポールピースとヨークを併用した磁気回路を構成し、その空隙磁束密度を NMR 法により精密に測定した。測定中に外部の浮遊磁界の影響が入るのを防



① : permanent magnets, ② : magnetizing coils, ③ : water ampule, ④ : pole pieces, ⑤ : spherical yoke, ⑥ : modulation field coil, ⑦ : RF field coil.
Fig.1 Cross section of the magnet assembly with a spherical yoke and the element of a NMR method used following measurements.

* 住友特殊金属株式会社技術開発部(Research & Development, Sumitomo Special Metals Co., Ltd., Osaka)

Table 1 Preparation of specimens.

Materials	Dimensions (mm)	Composition (wt%)	Heat treatments
Alnico 5	semi-col. ϕ 30 \times 20 col. ϕ 34 \times 20	8 Al-14 Ni-24 Co -3 Cu-0.5 Si-bal. Fe	1250°C \times 30 min soluted, 20°C/min field cooled, 650°C \times 30 min + 575°C \times 14 hr aged
Alnico 8	20 \square \times 25	7 Al-14 Ni-35 Co- 5 Ti-3 Cu-bal. Fe	1250°C \times 30 min soluted, 810°C \times 8 min field- treated, 650°C \times 30 min + 575°C \times 14 hr aged.
Fe-Cr-Co	ϕ 18 \times 20	28 Cr-23 Co-1 Si- bal. Fe	1300°C \times 30 min soluted, water quenched, 640°C \times 40 min field treated, 610°C \times 1 hr + 580°C \times 2 hr + 550°C \times 2 hr aged.

ぐために、ヨークは電磁軟鉄を用い、その外形を球形とした。これにより地磁気を約場にまでシールドすることができる。

各材料につき何個かの試験片をその量産磁石の同一ロットからサンプリングした。試験片の形状は Table 1 に示すような円柱または角柱状で、その使用個数を 2~6 個に加減して減磁曲線上の磁石動作点(パーミアンス係数)を種々変化させた。ポールピースには電磁軟鉄を使用し、その直径を 50 mm ϕ とした。これによる空隙磁束密度の均一度はギャップ中央の 30 mm ϕ 以内の空間で約 1×10^{-4} 以内である。

ポールピースの間に置かれた核磁気共鳴素子はイオン化した水(10% H₂SO₄ 水溶液)を入れたアンプルと、これを囲むコイル系(高周波コイルとモジュレーションコイル)とから成り、全体は非磁性体のケースに納められている。その寸法は約 10 mm \times 40 mm \times 60 mm である。空隙磁束密度 B_g は陰極線オシログラフのブラウン管中央に共鳴吸収波のピークをセットしたときの高周波磁界の周波数 f より求められる。この測定法の分解能はブラウン管上で識別できるピーク点の距離で与えられ、ここで用いた装置では、3000 Oe の磁界に対して約 10 ppm 程度である。

2. 経年変化量の定義

試験片磁石の周囲に着磁用コイルを巻き、これに十分な強さのパルス電流を通电して磁化した時刻を $t=0$ とする。その後の任意の時刻 t における磁束密度 $B_g(t)$ は時間の対数に対してほぼ直線的に変化することが知られている⁽²⁾。すなわち

$$B_g(t) = -S' \log_{10} t + C \quad (1)$$

ここに $S' (>0)$ は比例係数である。 C は 1 sec 後の B_g の値にあたる。したがって、経年変化を考慮して $B_g(t)$ の値を知るには基準となる時間における B_g の値と式(1)の S' 値を求めることが必要となる。式(1)によれば基準として $B_g(1)$ をとることが望ましいが、着磁 1 sec 後の B_g の測定は困難である。そこで本研究では着磁 10 sec 後の空隙磁束密度の測定値 $B_g(10)$ を基準にして経年変化を評価することとした。時刻 t における経年変化率を

$$\Delta B_g(t)/B_g(10) = -(B_g(t) - B_g(10))/B_g(10) \quad (2)$$

によって定義すると、式(1)によって

$$\begin{aligned} \Delta B_g(t)/B_g(10) &= S'/B_g(10) (\log t - 1) \\ &= S_{10} (\log t - 1) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで

$$S_{10} = S'/B_g(10) \quad (4)$$

を経年変化率パラメータと呼び、以下これを用いて経年変化の測定結果をまとめる。

S_{10} 値と $B_g(10)$ が与えられると、任意の時刻の $B_g(t)$ の値は

$$B_g(t) = B_g(10) \{1 - S_{10} (\log t - 1)\} \quad (5)$$

によって求められる。

なお、本研究では着磁 10 sec 後の B_g 値を基準としたが、一般に永久磁石の経年変化率は十分に小さいので 10 sec の代わりに 10^3 sec 以内の値(たとえば t_0 秒)を用いても $B_g(t_0)$ と $B_g(10)$ の違いは 2 次の微量として無視することができる。

従来の研究では、しばしば着磁後の基準時刻を明確にせずに S_{t_0} が用いられているが、その場合においても上記の理由によって相互にその測定結果を比較することが可能である。

3. 試料とその熱処理

各種スピノーダル型合金磁石の中から、半柱状晶 Alnico 5、柱状晶 Alnico 5、柱状晶 Alnico 8 および異方性 Fe-Cr-Co 磁石合金について測定を行なった。半柱状晶 Alnico 5 は従来の研究との比較のために取上げた。

これらの試料の減磁曲線を Fig. 2 に示す。柱状晶 Alnico

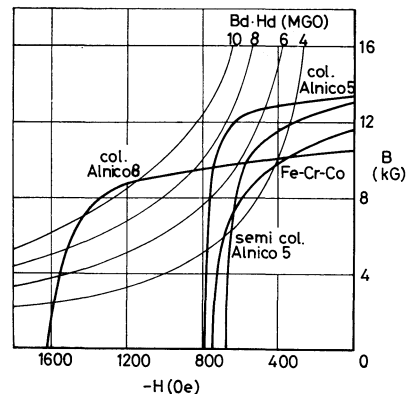


Fig. 2 Demagnetization curves of the specimens.

5 および Alnico 8 は、その減磁曲線の角率率が非常に優れており、ある磁石動作点で減磁曲線の勾配が急激に変化する。この点が $(BH)_{max}$ 点に相当する。この $(BH)_{max}$ 点の前後においてこれらの磁石の不可逆磁化率 χ_{irr} が著しく変化する (Table 3 参照)。Fe-Cr-Co 合金は新しく開発されたスピノーダル型永久磁石材料で、磁石特性は Alnico 5 とほぼ同等である。その経年変化に関しては、まだほとんど報告されていない。これらの試料の組成および用いた熱処理を Table 1 に示す。

III. 実験結果

1. 20°C における経年変化の長時間測定

従来の研究によれば Alnico 5 系磁石合金の経年変化が時間の対数に対して、ほぼ直線的となることが知られている。柱状晶 Alnico 5 および柱状晶 Alnico 8 磁石を用いた球形磁気回路の空隙磁束密度を着磁 10 sec から 10^6 sec を越えるまで測定した。この結果を Fig. 3 に示す。柱状晶 Alnico 8 磁石に対しては、このような 6 桁にもおよぶ広い時間幅にわたって、その経年変化が時間の対数に対して完全に直線的であることが確認された。これに対して柱状晶 Alnico 5 磁石でもほぼ 10^6 sec までは同様に直線的であるが、 10^6 sec 付近でいくらかのはずれが認められた。このような 10 day 以上にわたる長時間測定では周囲温度のドリフトがさげられないので温度係数の比較的大きい Alnico 5 磁石でその影響が現われたものと思われる。20°C 付近における磁束の温度係数を NMR 法で測定した結果、柱状晶 Alnico 8 ではその係数が $\pm 0.001\%$ 以下であるのに対して柱状晶 Alnico 5 では約 $-0.02\%/^{\circ}\text{C}$ であった。したがって Fig. 3 の直線からのはずれは高々 1°C 程度の温度ドリフトでも十分におこりうる。

これらの結果から、アルニコ磁石の室温における経年変化は時間の対数に対して十分に直線的であり、したがって

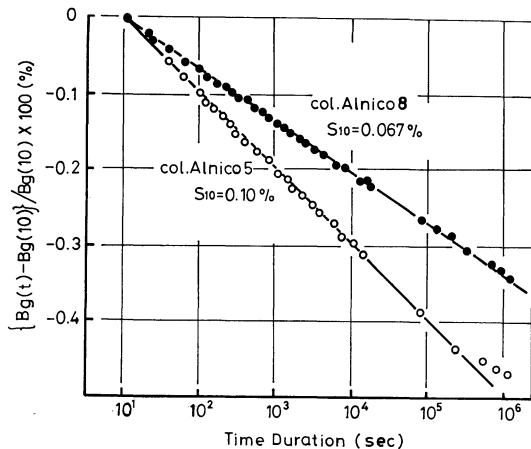


Fig. 3 Magnetic aftereffect of the gap flux density measured from 10 to 10^6 second after magnetizing.

その経年変化は比較的短時間の結果によっても予測しうることがわかった。先に定義したパラメータ S_{10} 値はこれら材料についてはそれぞれ 0.10% (Alnico 5) および 0.067% (Alnico 8) である。

2. 半柱状晶 Alnico 5 の経年変化

従来他の研究者の結果と比較するために半柱状晶 Alnico 5 磁石の経年変化を測定した。よく知られているように経年変化率は磁石動作点によっても大きく変化する。そこで磁石動作点を減磁曲線上 $(BH)_{max}$ 附近の点、それより B_r 寄りの点および H_c 寄りの点においた場合の経年変化の測定結果を Fig. 4 に示す。図中に併示した減磁曲線上に測定した磁石動作点を示す。図に見られるように、そのパーミアンス係数が小さくなるほど経年変化が大きくなる。比較のため Table 2 に従来測定結果を表示した。ここでは経年変化率の基準となる時刻 t_0 が測定者により $10^2 \sim 10^3$ sec にわたって異っているが、前にも述べたように、その違いによってもたらされる S_{10} 値の差は極めて小さいので著者の測定した S_{10} と十分に比較しうる。

表中の Gould と Kronenberg の結果は、磁石単体の測定結果であるのに対し、他は磁気回路による測定結果である。しかもそれぞれの測定において、磁石材質も動作点も異っているため、かなりの違いが認められるが、パーミアンス係数の高い動作点に対しては、いずれの結果も $S_{10} = 0.03 \pm 0.01\%$ でほぼ一致している。ところが $(BH)_{max}$ 点およびそれよりもパーミアンス係数の低い動作点では磁石単体法と磁気回路法との間にさきらかな差があり、前者の方が大きい S_{10} 値を示し、その経年変化が大きいことが認められる。

Néel の経年変化の理論によれば、経年変化量は減磁曲線上の動作点における不可逆磁化率 χ_{irr} に比例する。そこで各動作点における減磁曲線上の不可逆磁化率を測定した。その結果を経年変化率の測定結果などとともに Table 3 の第 1 段にまとめた。 χ_{irr} と S_{10} との関係については後で考察する。

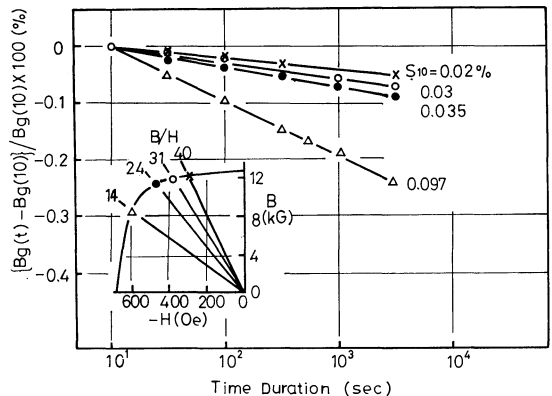


Fig. 4 The magnetic aftereffect at various operating points of a semi-columnar Alnico 5 magnet alloy.

Table 2 Previous results on the aftereffect in Alnico 5-type alloys.

Investigator	Material	Crystal	L/D	B/H	t ₀	St ₀
Gould ⁽⁶⁾	Alcomax III	random	6.0	(37.4)	1 min	0.04%
			4.1	(21.6)		0.15
			2.3	(9.5)		0.25
Kronenberg ⁽⁶⁾	Alnico V	random	5.8	(38.0)	0.1 hr	0.038
			4.3	(21.0)		0.155
			2.9	(11.4)		0.30
*Dietrich ⁽⁷⁾	Oerstit 500	random	—	≐70	1 min	≐0.02
			—	≐24		≐0.035
			—	≐9		≐0.06
*Present work	Alnico 5	semicol.	—	40	10 sec	0.02
			—	31		0.03
			—	24		0.035
			—	14		0.097

* NMR method

Alcomax III : 8 Al-13.5 Ni-24 Co-3 Cu-0.5 Nb-bal.Fe, Alnico V : 8 Al-14 Ni-24 Co-3 Cu-bal.Fe, Oerstit 500 : 8 Al-15 Ni-25 Co-3 Cu-bal.Fe

Table 3 Variations of χ_{irr} , S_{10} and S_p with operating points and permanent magnet alloys.

Material	B/H	I(G)	χ_{irr}	S_{10} (%)	S_p (Oe)
semi-col. Alnico 5	40	950	0.11	0.02	0.75
	31	920	0.16	0.03	0.75
	24	880	0.26	0.035	0.51
	14	680	41	0.097	0.007
col. Alnico 5	28	1030	≐0.0	0.017	∞
	21	970	0.08	0.045	2.34
	12	650	65	0.10	0.0046
col. Alnico 8	18	810	0.04	0.03	2.33
	8	720	0.20	0.045	0.68
	4	420	1.07	0.08	0.16
Fe-Cr-Co	25	730	0.20	0.135	2.10
	18	670	0.44	0.125	0.79
	11	440	1.24	0.37	0.55

3. 柱状晶 Alnico 5 の経年変化

Fig.5 は柱状晶 Alnico 5 磁石の経年変化を種々の磁石動作点において測定した結果である。半柱状晶 Alnico 5 磁石と比較すると、 B_r 寄りの動作点における S_{10} 値がいくらか小さくなっているが、その他の動作点についてはほとんど差がない。Table 3 の第 2 段にその S_{10} 値と χ_{irr} などがまとめられている。

4. 柱状晶 Alnico 8 の経年変化

室温での経年変化の同様な測定を柱状晶 Alnico 8 磁石について行なった。その結果を Fig.6 に示し、また Table 3 第 3 段に、その S_{10} , χ_{irr} などの値を表示した。柱状晶 Alnico 5 磁石と比較すると、 B_r 寄りの動作点では S_{10} 値が大きく、逆に H_c 寄りの点では S_{10} 値が小さくなっている。

5. Fe-Cr-Co 合金の経年変化

Fe-Cr-Co 磁石について同様な結果を Fig.7 に示し、そ

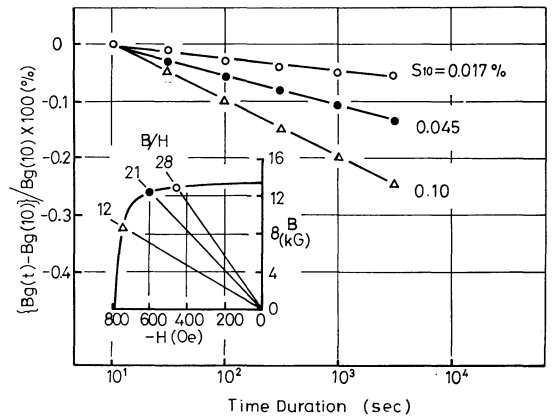


Fig.5 The magnetic aftereffect at various operating points of a columnar Alnico 5 magnet alloy.

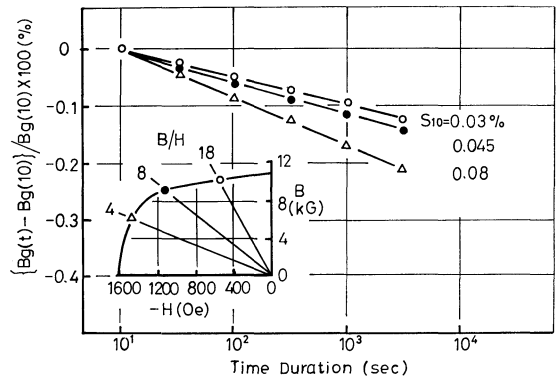


Fig.6 The magnetic aftereffect at various operating points of a columnar Alnico 8 magnet alloy.

の S_{10} , χ_{irr} などを Table 3 の最下段に掲げた。Fe-Cr-Co 磁石ではアルニコにくらべて S_{10} 値が大きいことが注目される。とくにパーミアンス係数が 18 以上では S_{10} 値はほ

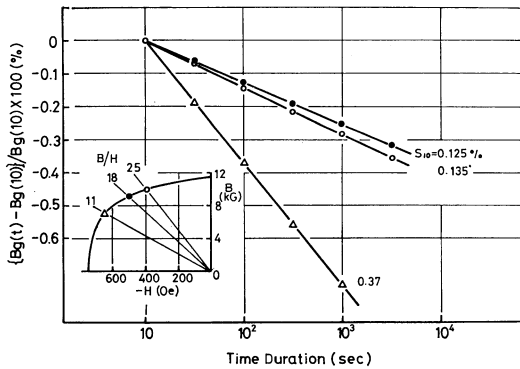


Fig. 7 The magnetic aftereffect at various operating points of Fe-Cr-Co magnet alloy.

とんど変化しない。図では $B/H=25$ の S_{10} が $B/H=18$ のそれよりもわずかに大きい値を示すが、温度ドリフトを考慮すれば、これらは実験誤差内で一致していると考えられる。

6. 経年変化の温度依存性

以上はすべて 20°C における経年変化を論じた。温度が高くなると経年変化が増大することが期待される。Fig. 8 は柱状晶 Alnico 5 磁石の $B/H=12$ の場合における、 $-20, 20$ および 40°C における経年変化の測定結果である。経年変化が温度とともに増大することは明らかであるが、核磁気共鳴法によっては、これ以上広い温度範囲にわたる測定が困難であるので、温度依存性については詳細な検討はできなかった。

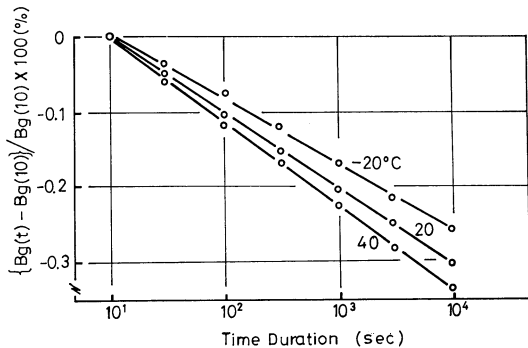


Fig. 8 Temperature dependence of the magnetic aftereffect of columnar Alnico 5 magnet alloy.

7. 安定化減磁の効果

実用的には経年変化を含む種々な減磁を防ぐために、着磁後直流または交流磁界を用いて、数%程度の減磁をあらかじめ行うのが普通である。この安定化減磁を行なった後の経年変化についても同様な方法で測定を行なった。

Fig. 9 は柱状晶 Alnico 5 について着磁後約 200 sec ぐらい経過したときに着磁用コイルに逆向き直流を通电して、それぞれ 0.8, 6 および 30% 減磁した後の経年変化を

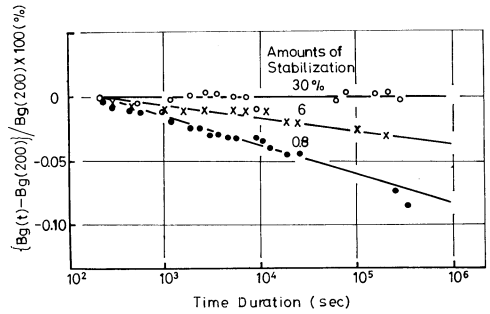


Fig. 9 Relations between the magnetic aftereffect and the prestabilization by DC pulse fields for columnar Alnico 5 magnet alloy.

示す。この試料の安定化減磁をしない場合の経年変化は Fig. 3 の下の直線に対応し、その S_{10} 値は 0.10% であった。0.8% の安定化減磁をした場合には S_{10} 値は約 $1/10$ に、6% の場合は約 $1/20$ に低下し、さらに 30% のものでは経年変化がほとんど消失する。

以上の結果から、わずかの安定化減磁では経年変化を小さくすることができるが、これを 0 にするためには相当量の安定化減磁が必要であることがわかった。

IV. 考 察

以上着磁 10 sec 後の B_g の値を基準にした経年変化率パラメーター、 S_{10} 値を用いて、種々の磁石材料の経年変化を示した。しかし永久磁石の使用にあたっては、上のような早い時間を基準とする経年変化の測定は、必ずしも適当ではないと思われる。というのは磁気回路を着磁してから装置に組立て、それを使用し始めるまでに一般にはかなりの時間(1日~1カ月)が経過する。その時の B_g 値を基準として、その後の経年変化を論ずることが望ましい。式(3)~(5)の定義から明らかなごとく、厳密にはその目的に対して S_{10} 値をそのまま用いることはできない。しかし本研究に取り上げた高性能磁石材料の S_{10} 値は十分に小さいので、1 カ月後の値を基準とする場合でも、その補正をほとんど必要としない。たとえば、 S_{10} 値が 0.3% であれば 1 カ月経過したときの B_g 値は 10 sec 後のそれに対して約 1.5% 低くなる。したがって 1 カ月経過した後の時間を基準にして、その後の経年変化を予測するときには、ここで示した S_{10} 値の約 0.985 倍の補正值を使用しなければならない。しかしこの補正值は 0.296% で、元の S_{10} 値とほとんど変わらない。

本実験でとり上げた $(BH)_{\text{max}}$ 点を中心にしたこれらパーミアンスの範囲は、これら材料が実用される動作点のほとんどを含んだものである。したがって、ここで測定した高性能磁石材料の S_{10} 値とパーミアンス係数の関係は実用的にも適用しうるものである。Table 3 に見られるようにこれらの磁石材料では、そのパーミアンス係数が低下すると S_{10} 値が大きくなる。その増加の程度はアルニコ磁石で

約 3~5 倍, Fe-Cr-Co 磁石で約 2~3 倍である。

最後に Néel の理論と比較して本研究の結果を考察しよう。

Néel は熱ゆらぎによる効果を仮想的な磁界変動で表わし, これによって磁化が不可逆に低下すると仮定して経年変化を論じた⁽⁸⁾。その変動磁界の振幅が時間の対数に比例して増加すると考えると, 着磁後の任意の時刻 t における磁化の強さ $I(t)$ は

$$I(t) = \chi_{\text{irr}} H_f(t) + C \quad (6)$$

$$H_f(t) = -S_0(Q + \ln t) \quad (7)$$

で表わされる。ここで χ_{irr} は試料の動作点における不可逆磁化率, $H_f(t)$ は時間的に変化する仮想磁界の振幅, S_0 は経年変化の大きさを与える物質定数である。また Q は, 40~50 の数定数で材料によってあまり変化しない。

本研究で測定した一定形状の磁気回路における空隙磁束密度 B_g は磁石の磁化 I に比例し, その比例定数は磁気回路の形状だけに依存すると考えられる。したがって $t=10$ sec を基準にして磁化の変化率 $\Delta I/I(10)$ は $\Delta B_g/B_g(10)$ に等しい。一方, 式(6)および(7)にもとづいて磁化の低下率を示すと,

$$\Delta I(t)/I(10) = 2.3 \chi_{\text{irr}} S_0 (\log t - 1)/I(10) \quad (8)$$

となる。よって式(8)と式(3)を比較すれば

$$S_{10} = 2.3 S_0 \chi_{\text{irr}}/I(10) \quad (9)$$

の関係が得られる。

Table 3 はここで測定した S_{10} 値とともに, それらの減磁曲線から求めた I および χ_{irr} が示されている。前に $B_g(10)$ について述べたと同じ理由により, この I の値を $I(10)$ とみなしてさしつかえない。そこで S_{10} , χ_{irr} および I の測定値から式(9)により計算した S_0 値を最後の列に表示した。

Néel は S_0 が物質定数となることを提言しているが, 表にみられるように, それぞれの材料について S_0 の値がその動作点によって大幅に変動している。一般にパーミアン係数が低くなると S_0 は著しく低下する。したがって, これらの材料に対し Néel の理論を直ちに適用することはできない。その一つの理由としては, これらの材料の磁化反転時における interaction domain⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ (または super domain) の出現が挙げられる。 B_r 点から H_c 点に至る減磁過程で 180° 反転領域が現われるとすれば, 経年変化による減磁も, その逆磁区の極めて緩慢な成長に結びつけられるであろう。そのような場合には Néel の示唆する仮想磁界あるいは χ_{irr} はその逆磁区境界における局所的な値をとらなければならない。そのような値はおそらくここで測定された χ_{irr} とはかなり異なるものとなると予想される。しかしながらそのような値は決して測定することはできないであろう。

この意味において Néel の考え方は興味あるものである

が, 少なくともこれらの材料に関しては, その理論にもとづいて実際の経年変化を予測することはできない。現段階では直接 S_{10} の測定値を求めて経年変化量を評価する方法によらざるを得ないと結論される。

V. 結 言

スピノーダル型永久磁石合金のうち, 比較的高性能の半柱状晶 Alnico 5, 柱状晶 Alnico 5, 柱状晶 Alnico 8 および Fe-Cr-Co 磁石の経年変化を種々の条件のもとで NMR 法で測定し, 経年変化パラメータ S_{10} を定義して測定結果を整理した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 着磁後 $10 \sim 10^6$ sec の時間にわたり, この種材料の経年変化が時間の対数に対して十分に直線的であることが確かめられた。

(2) 磁石のパーミアン係数が低くなると S_{10} 値が大きくなる傾向は各試料とも一致している。

(3) アルニコの場合, B_r 寄りの動作点では柱状晶 Alnico 5 の S_{10} 値が最も小さく, H_c 寄りでは柱状晶 Alnico 8 の S_{10} 値が小さい。しかし材料による S_{10} 値の差は比較的少なく, 特に実用的に重要な $(BH)_{\text{max}}$ 点附近では, ここで検討した 3 種類の材料について $S_{10} = 0.035 \sim 0.045\%$ の範囲内にある。

(4) これに対して Fe-Cr-Co 磁石の場合, いずれの動作点に対してもその S_{10} 値は異方性アルニコより大きい。

(5) 測定温度が高くなると経年変化は大きくなる。

(6) 着磁後の安定化減磁により経年変化はかなり低減できる。

(7) 得られた S_{10} 値を Néel の理論と比較した結果, これらの材料では, その理論だけで実際の経年変化を十分に説明することが困難であることがわかった。

文 献

- (1) A. Küssmann und O. Yamada : Arch. Elektr., **42** (1956), s.237/44.
- (2) E. Kneller : *Ferromagnetismus*, Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, (1962), s.648.
- (3) 山川和郎, 河野 充 : 金属材料研究所研究報告, 第 5 巻第 1 号, (1962), 8.
- (4) 佐々木 堂 : 電気学会誌, Vol. 88-3, No. 954 (1968), 129.
- (5) 金子秀夫, 本間基文, 中村久三, 星 俊治 : 金属学会講演概要集, (1972-10 月), 275.
- (6) D. Hadfield : *Permanent Magnets and Magnetism*, Iliffe book Ltd., (1962), 458.
- (7) H. Dietrich : Sonderruck aus der Zeitschrift, "FEIN WERKTECHNIK", Heft 7 (1968), 313.
- (8) L. Néel : J. Phys. Radium, **11** (1950), s.49 ; **12** (1951), s.339.
- (9) Y. Iwama : Trans. JIM, **9** (1968), 273.
- (10) L.F. Bates, D.J. Craik and E.D. Isaac : Proc. Phys. Soc., **79** (1962), 970.