

バリウムフェライト磁石の熱的性質について

Thermal Characteristics of Barium Ferrite Magnet

原 田 英 樹* 金 本 理 成*
Hideki Harada Michinari Kanamoto

内 容 梗 概

バリウムフェライト磁石の熱処理に対し理論的考察を加えるため、炉内および磁石内の温度分布実測値、そのほかより比熱および熱伝導率を検討した。その結果バリウムフェライト磁石の比熱は約 0.13 cal/g・°C、熱伝導率は約 0.003 cal/cm²・s・°C となり、それぞれ磁石の製造条件により異なった値を示す。これらの熱定数の値よりバリウムフェライト磁石の温度伝導率および質量効果などを検討した。

1. 緒 言

異方性および等方性バリウムフェライト磁石の特性⁽¹⁾および磁石製品の応用⁽²⁾に関してはすでに本紙に報告した。今回はさらにこの特色ある磁性を示すバリウムフェライト磁石の熱的性質について報告する。

バリウムフェライト磁石は国内に多量に産する BaCO₃ および Fe₂O₃ を主原料とし、粉碎、混合、成形、焼成のいわゆる粉末冶金の方法で製造される。したがって小形異形の磁石で量産を必要とするものに対し著しく生産性が高い。また抗磁力 H_c が 1,500~2,500 Oe と他の実用磁石のいずれよりも大きく、かつマイナーループが減磁曲線上にあるため、着磁したまま発送したり組み立てたりすることが可能である。したがって大形の磁選機や玩具などにも適している。このような特色をもつバリウムフェライト磁石もその使用にあたって磁性ばかりでなく、熱、電気および機械的性質を十分考慮して用いねばそのすぐれた特色を生かすことはできない。以下に特にバリウムフェライト磁石の熱的性質について述べる。

2. 試 料

実験に使用せる試料は種々の形状に成形せるバリウムフェライト磁石およびその原料粉体である。試料の磁気特性を第 1 表に示す。表中 YBM 1 および 2 は異方性磁石で磁気使用方向にすぐれた特性を示す。YBM 1 は B_r が高くエネルギー積も大きい。YBM 2 は H_c が大きい。YBM 3 は磁気的特性が等方的で、したがって平均の磁性は異方性のものより悪い。減磁曲線は正確に直線である。

バリウムフェライト磁石の熱処理に用いる耐火材料は炭化ケイ素またはアルミナが用いられるが、それらの諸特性を第 2 表および第 1 図に示す。SiC は半導体特性を示し、温度の上昇とともに熱伝導率が低下することが知られている。アルミナは温度の上昇とともにわずかに熱伝導率は上昇するが、平均値は SiC の 1/5 程度である。

3. バリウムフェライト磁石の熱定数⁽³⁾

バリウムフェライト磁石の焼結および熱消磁の条件を定めるためバリウムフェライト磁石の比熱および熱伝導を求めた。

3.1 比 熱

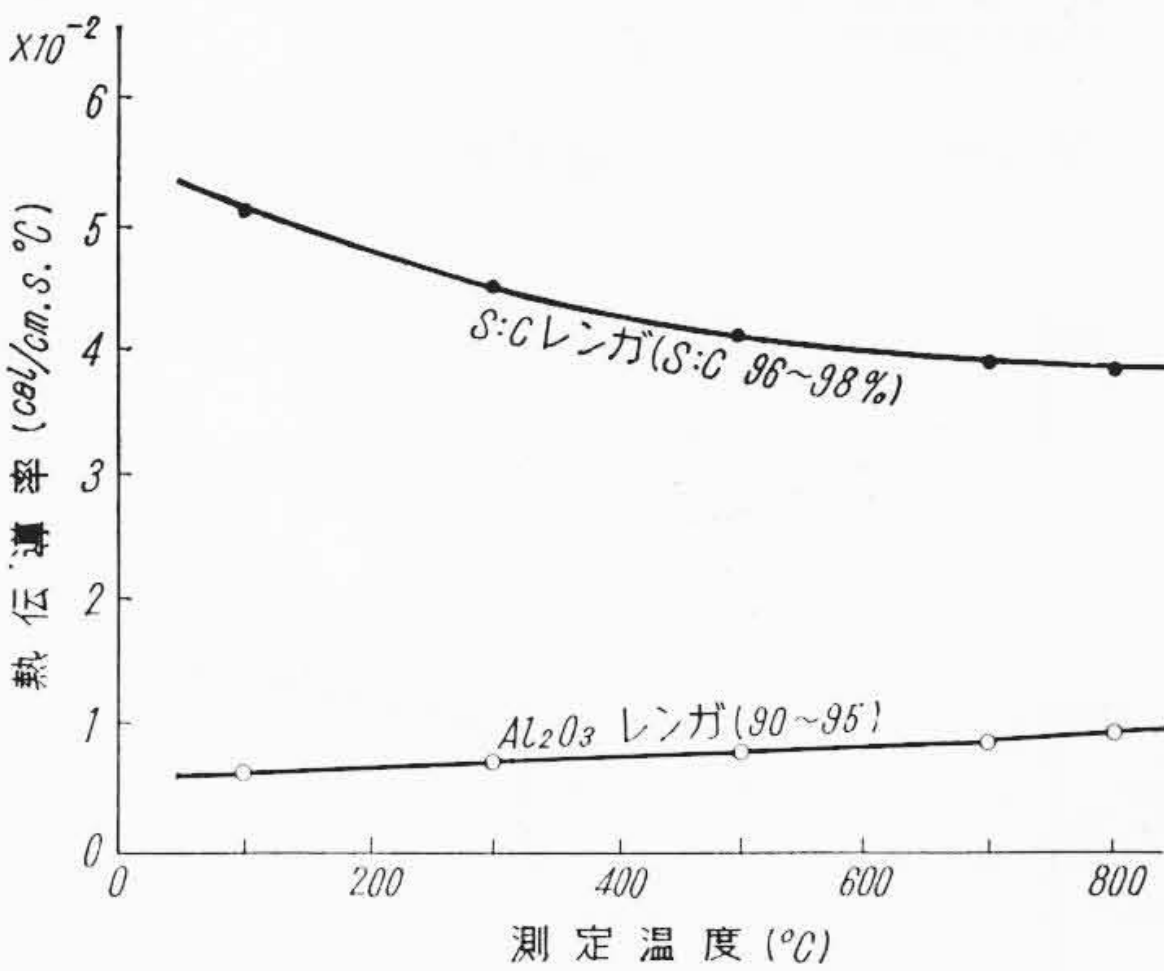
比熱の測定は通常行なわれている断熱された銅容器内の水温の上昇より求めた。試料は前節の異方性および等方性磁石を 30~50g に成形し、100~120°C に加熱し、300~500 cc の水中に投入し、水温および容器の温度上昇より試料の比熱を求めた。容器の熱容量は銅、温度計、温度計保護用ガラスウールを合わせて 26.5 cal/°C である。測定値は次の式により比熱を算出した。

第 1 表 実験に用いたバリウムフェライト磁石の特性

材 質	P_r (G)	H_c (Oe)	$(P_r H_c)_{max}$ ($\times 10^6$ G·Oe)
YBM-1	3,700~4,200	1,500~1,800	3.0~3.5
YBM-2	3,300~3,500	2,000~2,500	2.2~2.5
YBM-3	2,100~2,600	1,500~1,800	0.9~1.2

第 2 表 保護用耐火物の性質

性質 レンガ	純度	比 熱 (1,000°)	耐火度	見かけ 比 重	気孔率	圧縮抗力 (kg/cm ²)	熱膨脹率 ($\times 10^{-6}$)	荷重軟化 点 (°C)
SiC	>95	0.31	SK42	3.6	14	1,000	0.45	>1,800
Al ₂ O ₃	>92	0.30	40	3.7	32.5	350	0.76	>1,500



第 1 図 耐火物の熱伝導率

$$C = \frac{(\theta - \theta_0)(w + 26.5)}{W(\theta_1 - \theta_0)} \dots \dots \dots (1)$$

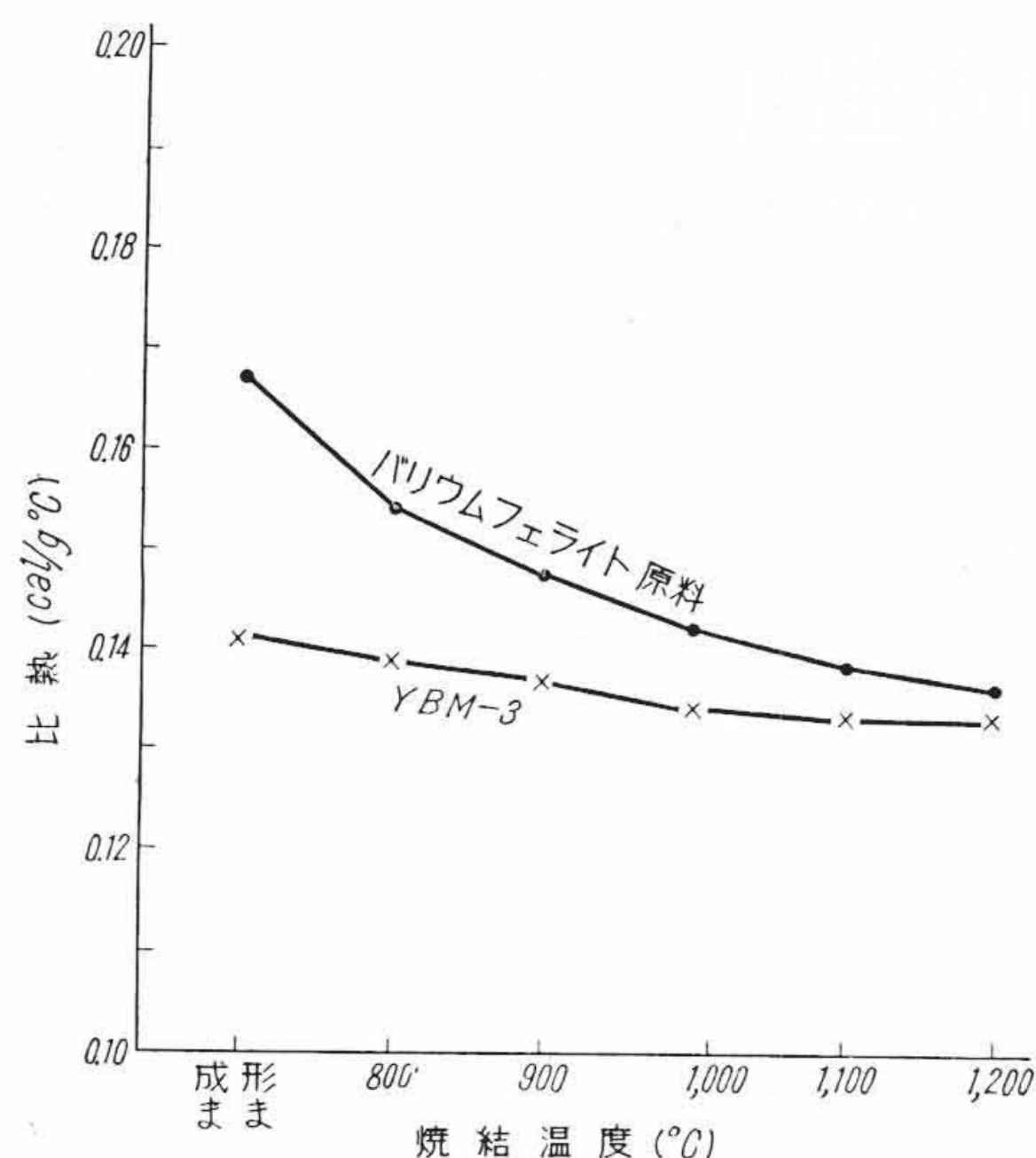
ここで C : 被測定物の比熱
 θ : 最終水温 (°C)
 θ_0 : 初期水温 (°C)
 w : 水の重量 (g)
 W : 試料の重量 (g)
 θ_1 : 試料加熱温度 (°C)

測定結果を第 2 図に示す。フェライト化合物が形成されていく過程ではかなり急速に比熱が減少する。Fe₂O₃ の比熱は約 0.16, BaCO₃ は約 0.18, そのほかの添加物および空気の比熱を省略すれば、混合物の比熱は約 0.167 となり実測値と一致する。バリウムフェライト磁石が形成される 1,200°C では比熱はほぼ 0.137 となる。同様に等方性バリウムフェライト磁石の比熱も焼結温度とともに減少し、YBM-3 相当品は常温で約 0.135 の比熱を示す。

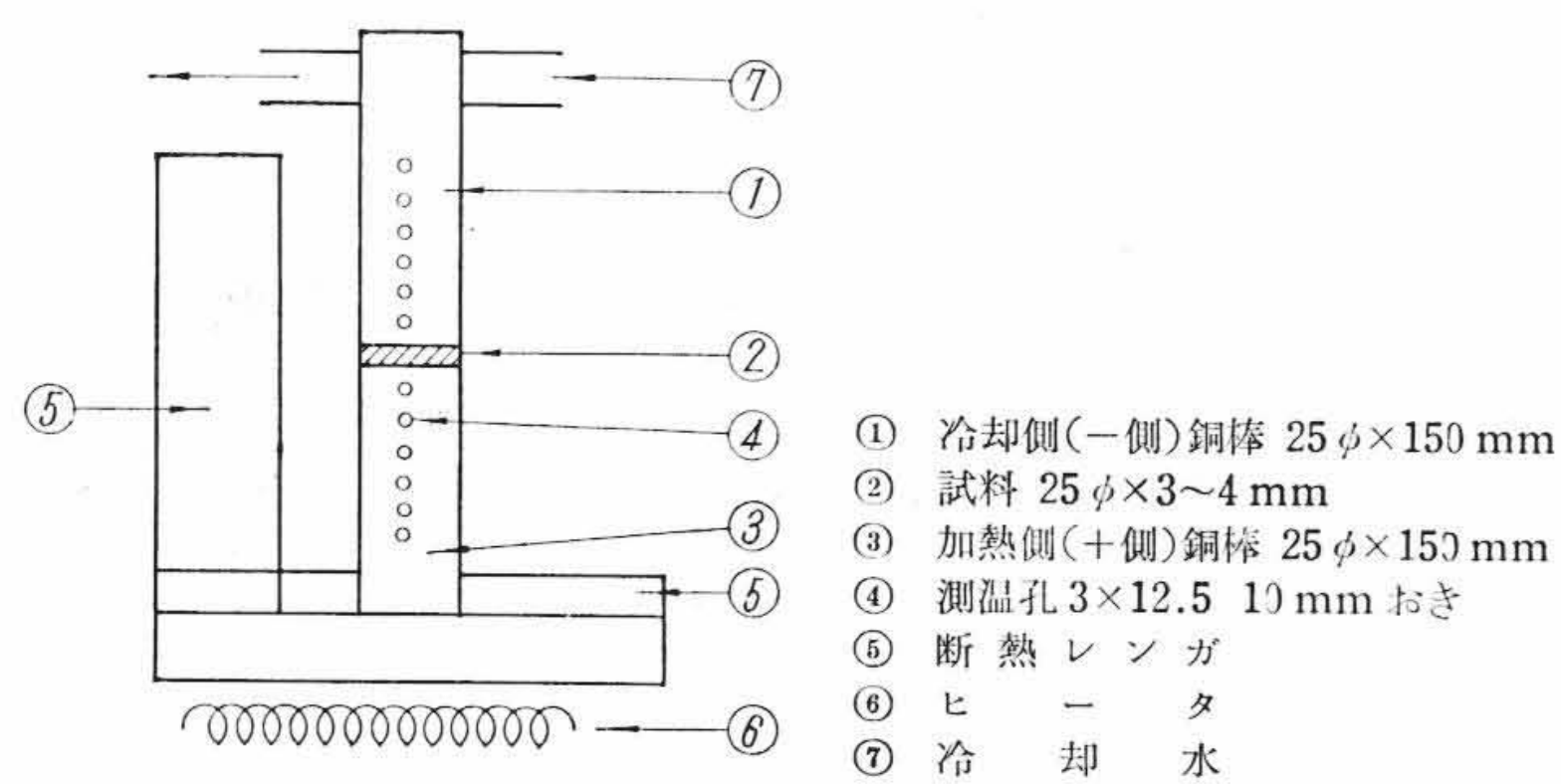
3.2 熱 伝 導 率

熱伝導率の測定は薄い絶縁材料の測定に応用する第 3 図のような

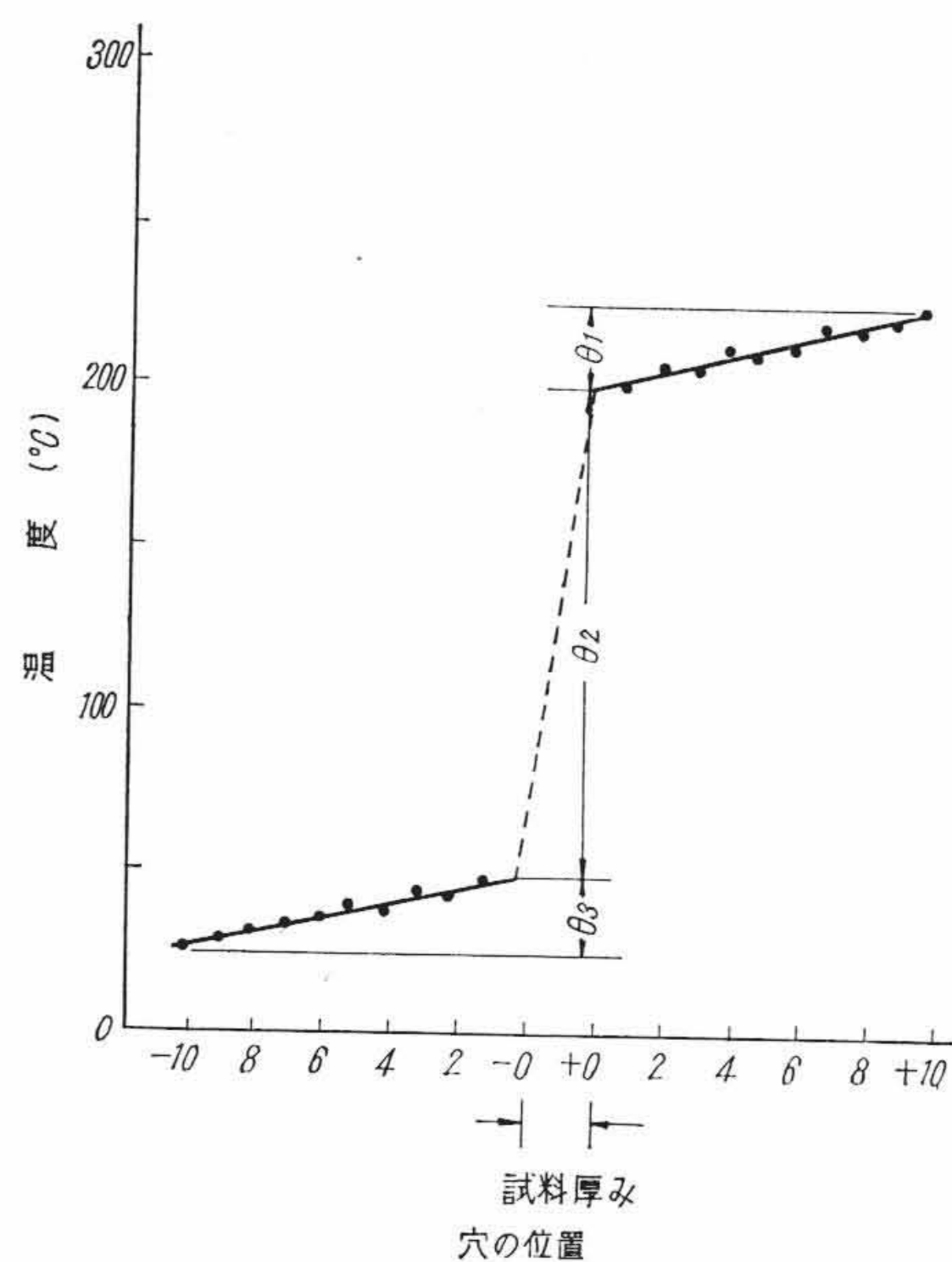
* 日立金属工業株式会社安来工場



第 2 図 バリウムフェライト磁石の比熱



第 3 図 フェライト磁石熱伝導率測定装置



第 4 図 フェライト磁石熱伝導率測定例

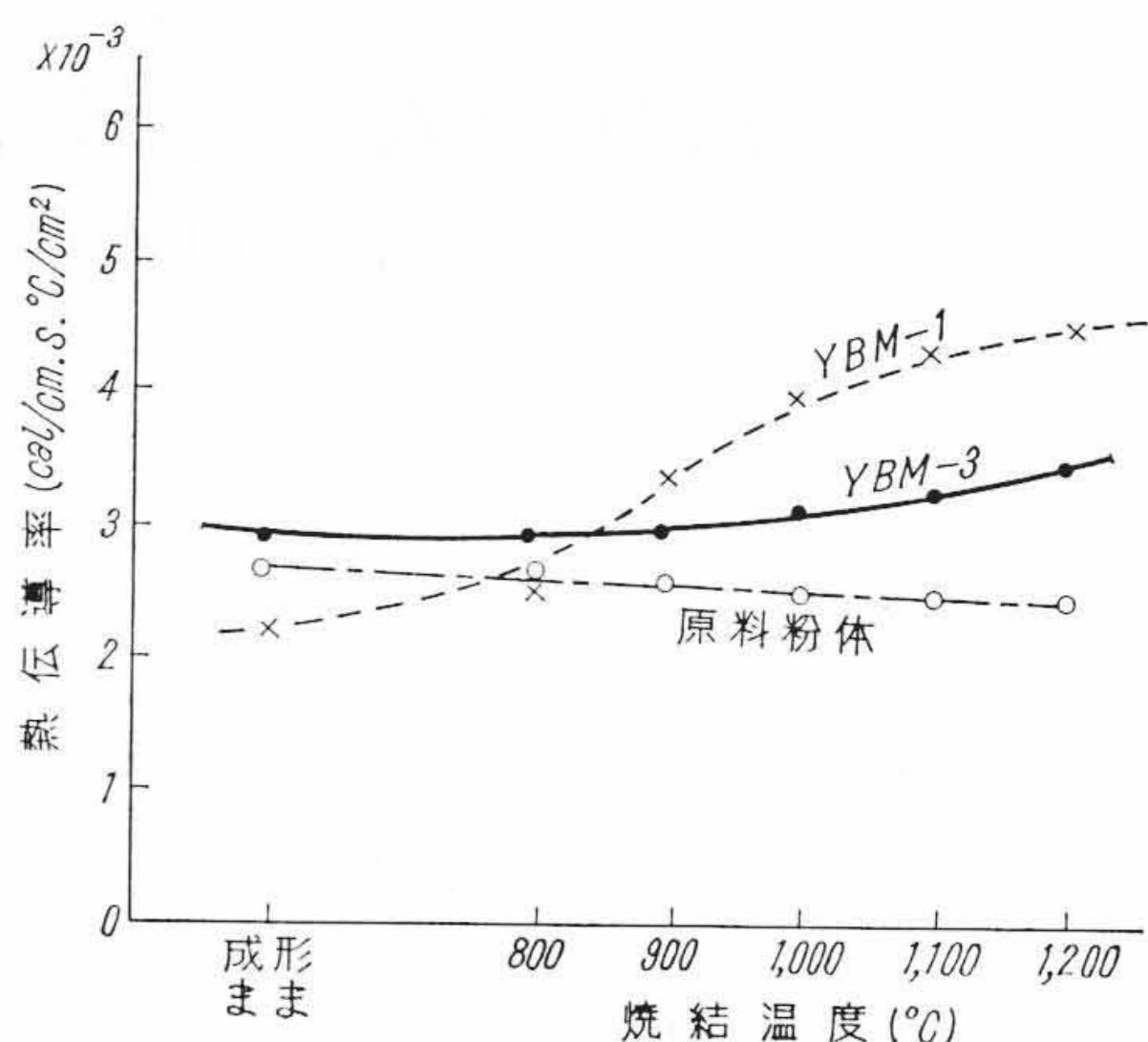
測定装置を製作し用いた。この測定装置による測定値は第 4 図に示すように、上下それぞれ 10 個の銅の穴の温度より銅の長さに対する温度傾斜と試料内の温度傾斜を求め、(2)式のとおり計算した。

$$\lambda = \frac{\lambda_{Cu}}{2} \times \frac{x}{\theta_2} \times \left(\frac{\theta_1}{n_+} + \frac{\theta_3}{n_-} \right) \quad (2)$$

ここで λ : 被測定試料の熱伝導率 (cal/cm・s・°C)

λ_{Cu} : 試料支持棒銅の熱伝導率 (cal/cm・s・°C)

x : 試料の厚み (cm)



第 5 図 フェライト磁石の熱伝導率

θ_2 : 試料両端面間の温度差 (°C)

θ_1 : +側試料支持棒測定穴間の温度差 (°C)

θ_3 : -側試料支持棒測定穴間の温度差 (°C)

n_+ : +側試料支持棒測定穴間の距離 (cm)

n_- : -側試料支持棒測定穴間の距離 (cm)

その原理は(3)式に示すように、定常状態となった一次元の温度こう配と熱伝導率の積が異種物質の接合においても一定となることを利用せるものである。

$$\lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial x_1} = \lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial x_2} = \lambda_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial x_3} = \dots \quad (3)$$

λ_{Cu} として 0.92 cal/cm・s・°C を用いた。試料は 25 ϕ × 3~4 mm 厚さに 1 t/cm² の圧力で成形し熱処理せる試料を厚さ方向 ±0.05 mm に平行研磨し用いた。

熱伝導率は試料の形状、特に空気の混入量により大きく影響され、また銅と試料との接合部での伝導に問題が大きい。したがって試料両端面に -325 メッシュの銅粉を用い、表面の凹凸および傾斜による損失を防いだ。このようにして測定せるバリウムフェライト磁石の熱伝導率を第 5 図に示す。

バリウムフェライト磁石原料の熱伝導率は焼成の進行によってほとんど変化せず、ほぼ 0.0025~27 の値を示す。異方性磁石は成形方向の熱伝導率が焼結過程とともに増加するが、これは C 軸方向の熱伝導率が他の方向より大きいことを示している。

4. 熱処理、加熱過程の解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾

4.1 概 要

前節においてバリウムフェライト磁石およびその原料の熱定数に関し検討したが、その結果を使って加熱過程における温度上昇を検討する。

直交座標の熱伝導の微分方程式は(4)式のとおりである。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \Delta \theta + \frac{q}{\rho c} \quad (4)$$

ここで θ : 被加熱体温度

t : 時間

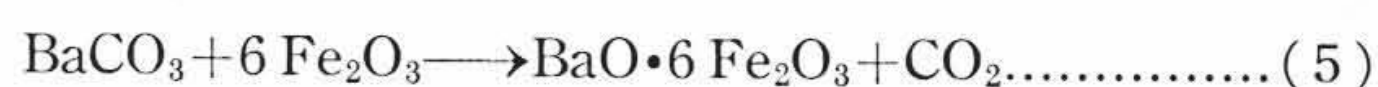
λ : 熱伝導率

ρ : 密度

c : 比熱

q : 発生熱量

現在考察するバリウムフェライトの焼結にあたって、化学反応として、主成分間の



なる吸熱反応が徐々に行なわれるが、付与熱量に対しわずかである

ので $q \equiv 0$ として考察する。また考察に便ならしめるため座標軸を一次元にとると、(4)式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$= a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (6)'$$

ここで a : 温度伝導率
となる。この一般解は

$$\theta = A + Bx + Ce^{-pt} e^{qx} \quad (7)$$

$$\theta = A + Bx + Ce^{-aq^2 t} \cos(qx) \quad (8)$$

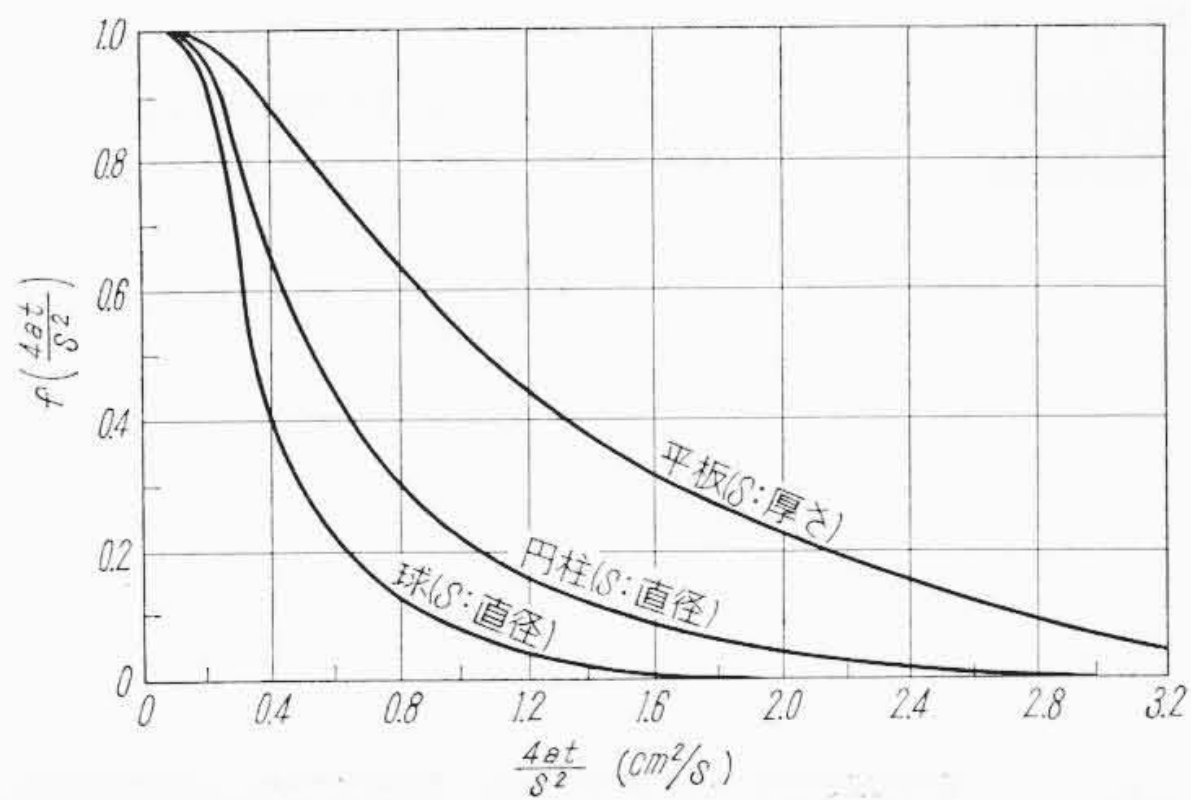
$$\theta = A + Bx + \frac{C}{\sqrt{t}} e^{-\frac{(q-x)^2}{4at}} \quad (9)$$

などと表わされる。ここで A, B, C, p, q はそれぞれ定数であるが、一般にはフーリエ級数に展開された複雑な値となり項数も多い。

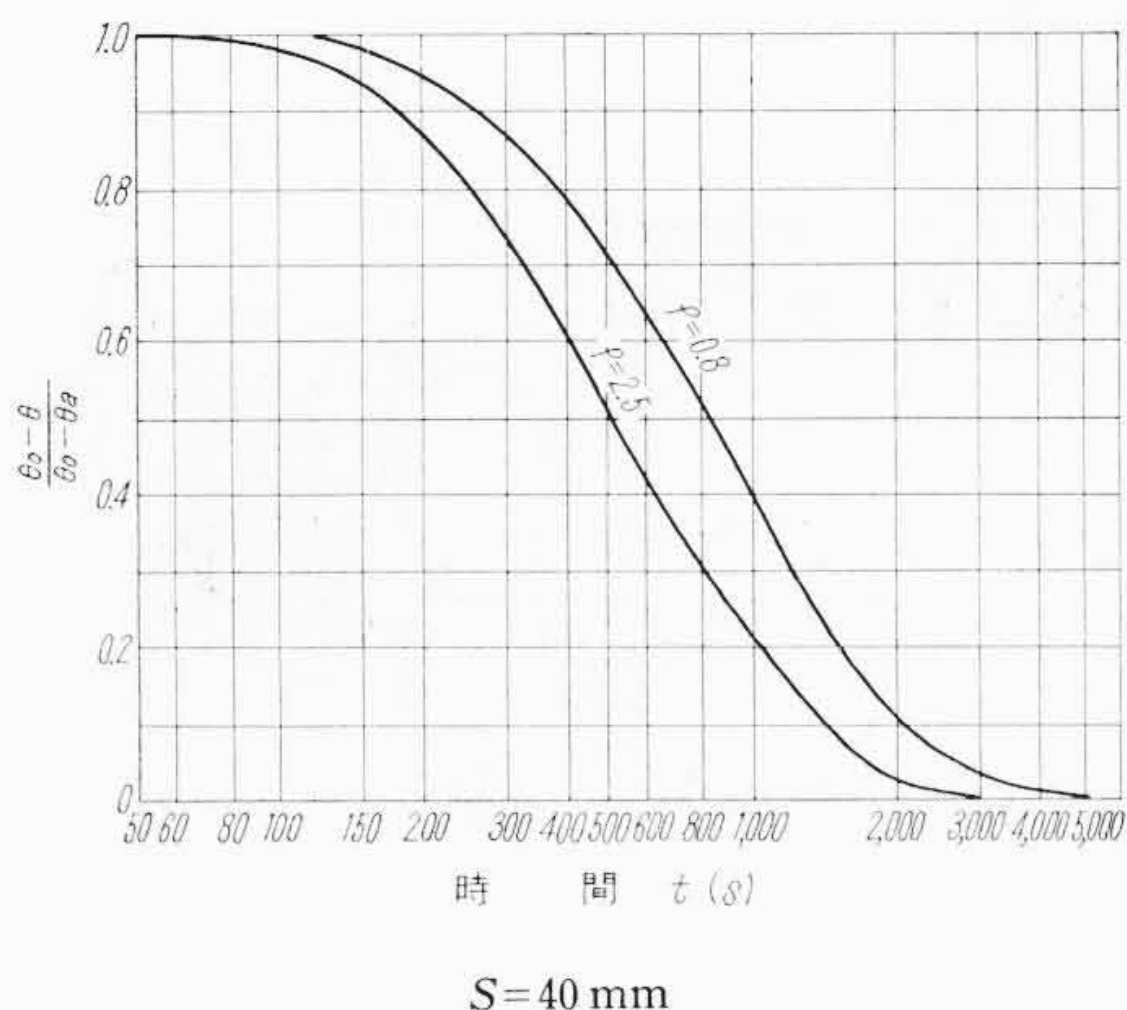
いま境界条件として無限に広い厚さ S cm の平板の上面および下面が θ_0 より θ_a に1回突然変化したとする。この条件を満足する解は(8)式で A, B, C, p, q に値を入れると

第3表 バリウムフェライト磁石の熱的性質

質 物	内 容	熱伝導率 λ (cal/cm·s·°C)	密 度 ρ (g/cm ³)	比 熱 C (cal/g·°C)	温度伝 導率 a (cm ² /s)	a の 比率
銅	Si10C	0.12 (42 kcal/mh·C)	7.9	0.108	0.28	1.00
バリウムフェライト磁石	YBM-3	0.0030	4.8	0.138	0.0054	0.019
バリウムフェライト磁石	YBM-1	0.0035	5.0	0.134	0.0052	0.019
バリウムフェライト原料	—	0.0006	0.8	0.14	0.0051	0.019
バリウムフェライト原料	—	0.0025	2.5	0.14	0.0071	0.025
SiC レンガ	純度97%	0.04	3.6	0.31	0.036	0.13
Al ₂ O ₃ レンガ	純度95%	0.01	3.7	0.30	0.009	0.032



第6図 E. D. Williamson, L. H. Adams の解法による $f\left(\frac{4at}{S^2}\right)$ の値



第7図 バリウムフェライト磁石原料の焼結過程における温度変化

$$\theta = \theta_0 + (\theta_a - \theta_0) \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} e^{-\frac{(2n-1)^2 a \pi^2 t}{S^2}} \cdot \cos \frac{(2n-1) \pi x}{S}$$

$$= \theta_0 + (\theta_a - \theta_0) f\left(\frac{4at}{S^2}\right) \quad (10)$$

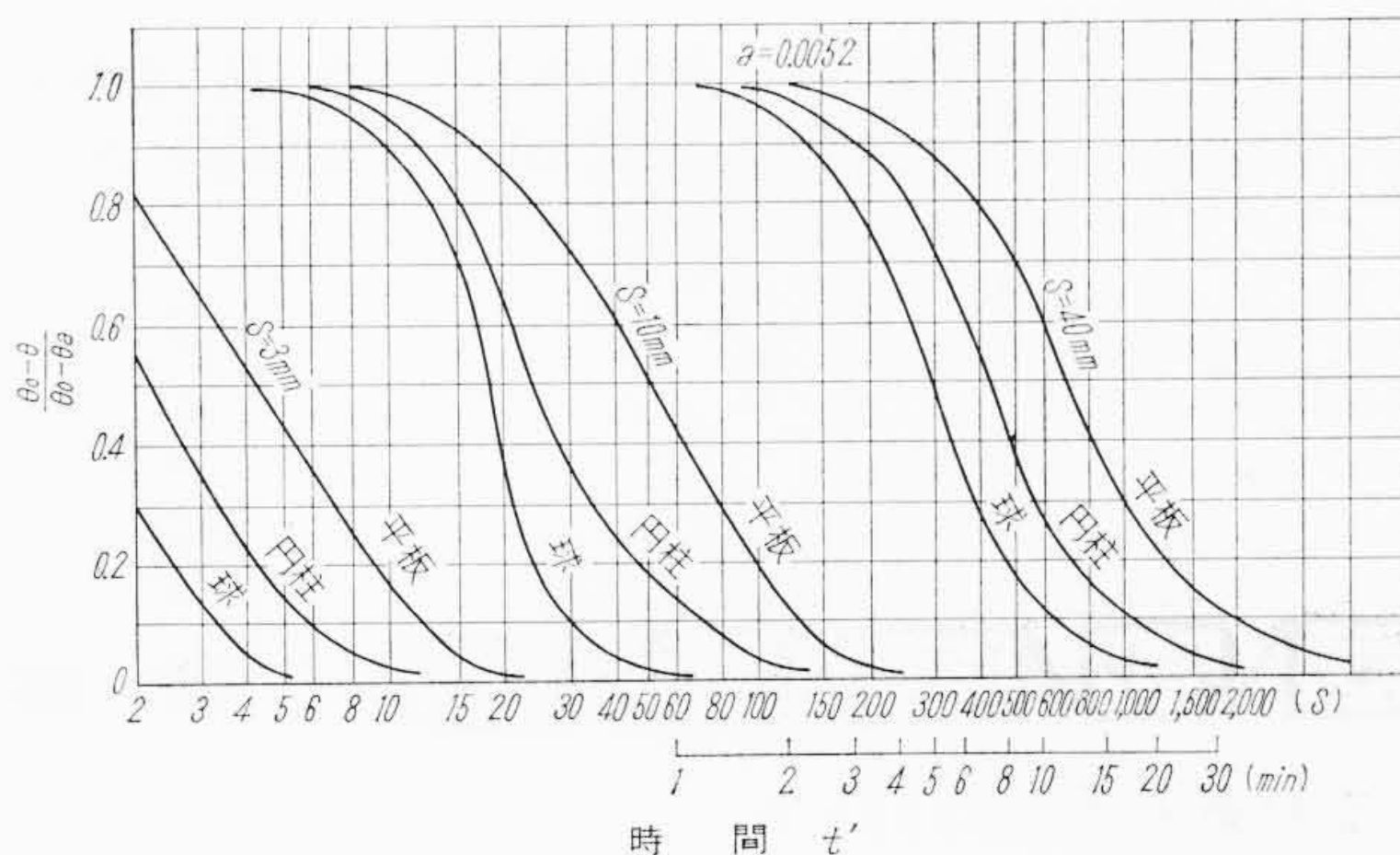
と表示される。この $f\left(\frac{4at}{S^2}\right)$ の値を第6図に示す。同時に無限長円柱および球の場合の計算結果も示した。第6図の単位は t を秒, S を cm という cgs 単位系で表示されている。これは磁石に適用する場合便利にするためである。

(10)式および第6図の結果を用い、バリウムフェライト磁石の焼結過程における温度変化を計算し第7~9図に示す。またこれらの計算に用いた定数を第3表に示す。

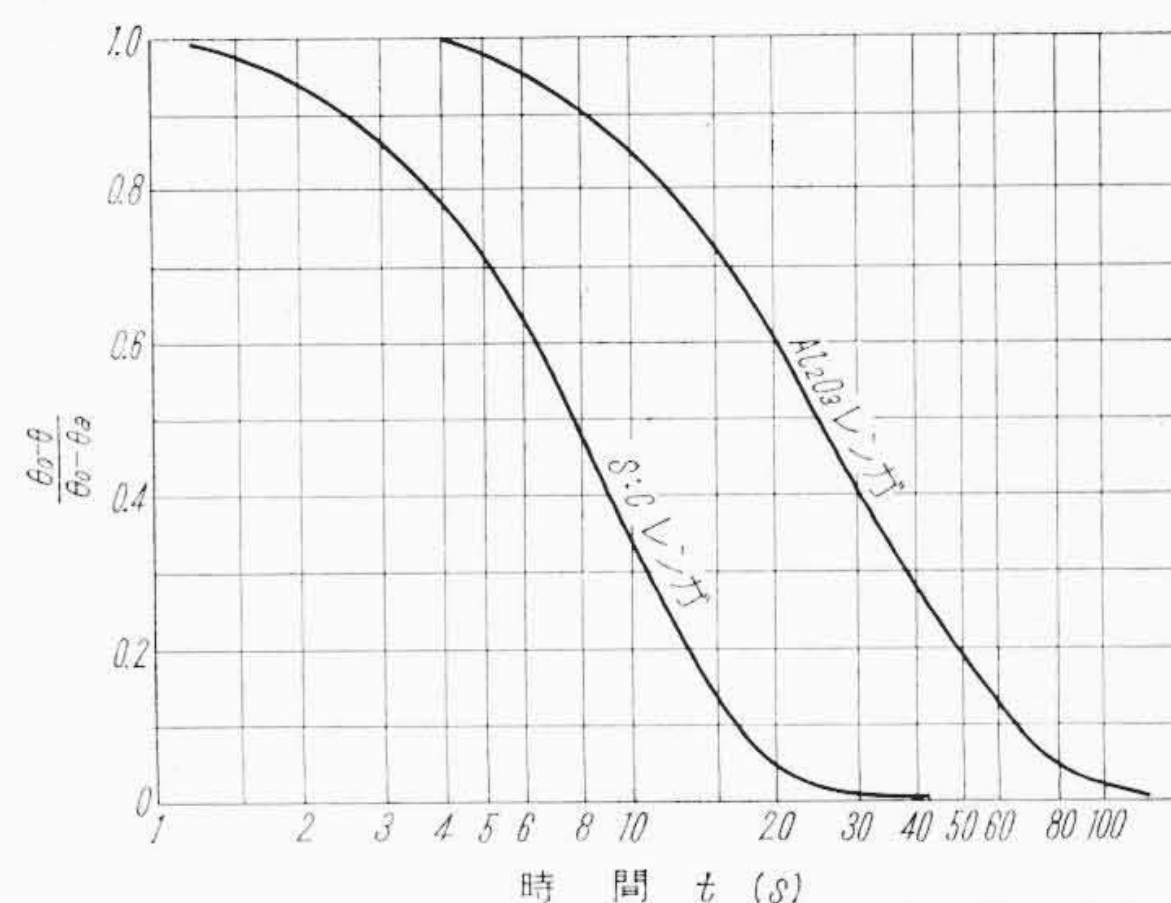
第3表において銅の場合と比較すると、熱伝導率 λ は銅を1とすると、SiC レンガが約 1/3, Al₂O₃ レンガが約 1/10, フェライト磁石が約 1/40 となる。温度伝導率 a はフェライト磁石が約 1/50 となる。したがって定性的には鋼の熱処理の方法にこの倍率をかければよいのであるが、鋼の場合の炭化物の固溶、結晶変態などの速度と粉体の焼結速度は本質的に異なる。固溶のほうが体積拡散であるのに比し、粉体は表面拡散におうところが大きく、したがって粉体の温度上昇後の保持時間は鋼の場合ほど長くする必要はないように考えられる。これらの結晶成長は前にも報告せるとおり、温度および保持時間に対し指数および対数関数にて表示できる変化を示す。

4.2 バリウムフェライト原料粉体の場合

バリウムフェライト磁石原料粉体の焼結過程の温度上昇を検討するため、 S すなわち粉体積層厚さを 40 mm にした場合の計算結果を第7図に示す。熱定数特に温度伝導率が比重により大きく変化するため、 $(\theta_0 - \theta) / (\theta_0 - \theta_a)$ すなわち均一かつ一定の外周温度と中心温度との差の比が 0.05 すなわち 5% 以下となる温度は、 $\rho_A = 2.5$ の場合、1,600 s (27 min), $\rho_A = 0.8$ の場合 2,500 s (43 min) のとき得られる。



第8図 フェライト磁石の焼結過程の温度変化



第9図 耐火物の温度変化

また S を変えた場合、中心温度の外部温度との差が 5% 以下となる時間は、 $\rho=2.5$ の場合

$$t = \frac{S^2}{4a} \times 2.9 = 102 S^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここで t : 時間 (s)
 S : 積層厚さ (cm)
 $\rho=0.8$ の場合

$$t = 134 S^2 \dots\dots\dots (12)$$

で表示される。

4.3 バリウムフェライト磁石の場合

バリウムフェライト磁石の形状は種々雑多であるが、板状、細長い円柱状およびずんぐりした球状の 3 種に大別し、それぞれ厚さまたは直径を S cm とし、温度伝導率 $a=0.0052$ として $(\theta_0-\theta)/(\theta_0-\theta_a)$ と時間との関係を第 8 図に示す。厚さが薄いほど、また形状が球に近いほど中心温度の上昇は早く、 $S=3$ mm の場合は 30 s 以下となる。しかし実用上は何段にも積み重ねて焼結する場合が多いので、それぞれ近似せる形状を想定せねばならない。たとえば 10 mm $\phi \times$ 4 mm のものを 10 個積んだ場合は $S=10$ mm の円柱に近似してよいが、これを多数密接して立てた場合はむしろ $S=40$ mm の平板に近くなるであろう。したがって近似形状を上手に想定し温度上昇時間を計算して保持時間を決定するには、次の 3 式を一つの目安として大きな誤りを生じない。

磁石の形状がスピーカ用磁石のように外径が著しく大きい場合などは平板の式として、厚さ S cm、時間を t s として

$$t = \frac{S^2}{4a} \times 2.9 = 139 S^2 \dots\dots\dots (13)$$

細長い円筒の場合径を S cm として

$$t = 96 S^2 \dots\dots\dots (14)$$

高さおよび径がほぼ同一のものは

$$t = 58 S^2 \dots\dots\dots (15)$$

と表示される。

実用例としてスピーカ用 70 $\phi \times$ 10 t の磁石を 4 段に積み加熱する場合、外部温度と中心部の温度差が 5% 以下となる時間は $S=4.0$

cm を入れ、 $t \approx 40$ min となる。

また S が特に小さく、5 min 以下保持時間が終了する場合は、保護耐火物の熱伝導を考慮する必要がある。

4.4 耐火物の熱伝導

耐火物の厚さを 10 mm とした場合の $(\theta_0-\theta)/(\theta_0-\theta_a)$ と時間の関係を SiC レンガおよびアルミナレンガに関し、第 9 図に示す。中心部の温度と外部との温度差が 2% 以下になるのは SiC レンガで 25 s、アルミナレンガで 100 s となる。したがって熱容量の十分大なる加熱炉を用いるならば保護耐火物の熱伝導時間は、バリウムフェライト磁石のそれに対しほとんど無視しうることがわかる。

5. 結 言

- (1) バリウムフェライト磁石およびその原料の比熱および熱伝導率を測定し、加熱過程の温度変化を検討した。
- (2) バリウムフェライト磁石の比熱は約 0.13 cal/g $\cdot$ $^{\circ}$ C で、製造条件により異なる。
- (3) バリウムフェライト磁石の熱伝導率は 0.003 cal/cm 2 $\cdot$ s $\cdot$ $^{\circ}$ C で、異方性磁石の C 軸方向にはやや大きく、また製造条件によっても変化する。
- (4) 磁石中心部の温度変化は想定する形状により、ある程度推定することができ、その結果は実測値とほぼ一致する。
- (5) 加熱過程の中心温度と外周温度の温度差の比が 5% 以下となる時間は $t=60 \sim 140 S^2$ (s) となる。ただし S は直径または厚さを cm 単位で表示する。

終りにのぞみ、終始ご指導された中央研究所菊田博士、安来工場小柴博士に深謝する。

参 考 文 献

- (1) 小柴，原田：日立評論
- (2) 小柴，原田：日立評論
- (3) 大石ほか：熱学量測定法（昭 34-8 日刊工業新聞）
- (4) 栗野ほか：伝熱工学（昭 29-10 丸善）
- (5) A. Schack：Der Industrielle Wärmeübergang（1940-9, Stahleisen）



新 案 の 紹 介

登 録 新 案 第 502838 号



椎 名 勝

微 動 回 転 タ イ マ ー ス イ ッ チ

駆動電動機 1 の回転軸はウォーム歯車装置 2，連結装置 3 を介してタイマー用ドラム 4 に連結されている。タイマー用ドラム 4 の表面には、セグメント 5 と固定接点 6 からなるタイマースイッチが配置され、ハンドル 7 がタイマー用ドラム 4 の回転軸に設けられている。時間の設定は、タイマー用ドラム 4 のセグメント 5 と固定接点 6 との関係位置をハンドル 7 を反時計方向に回転することにより、ウォーム歯車装置 2 と無関係に行われる。タイマーとしては、駆動電動機 1 によりウォーム歯車装置 2 のウォームホイールが反時計方向に回転することによって行われる。

(鎌 田)

