

# フェライト技術の系統化

Historical Development of Ferrite Technologies

一ノ瀬 昇

Noboru Ichinose

## ■ 要旨

セラミックスは、古代からの天然原料を成形、焼成した陶磁器に代表される伝統的なセラミックスと近年開発された精選された原料を用い、細かく制御された製造方法により得られるファインセラミックスに大別される。ファインセラミックスは要求される機能に応じてますます高度化・高機能化され、エレクトロニクスセラミックスはその代表的なものである。

エレクトロニクスセラミックスは、セラミックスのもつ磁性、絶縁性、誘電性、圧電性、半導性が優れており、電子機器産業分野で幅広く活用されている。本調査ではこれらエレクトロニクスセラミックスの中から磁性を有するフェライトを取り上げ、電子機器製品に応用される基盤技術、エポックメイキング技術を中心に、当該技術発展の歴史をサーベイし、その技術の系統化を図ることを目的としている。

フェライトが本格的に工業化されてから約 75 年が過ぎようとしている。この間、1950 年から 1980 年迄の 30 年間は、フェライトの学問と工業が世界各国で飛躍的に発展したフェライトの黄金時代であった。現在でもフェライトの生産はそこそこ行われているが、生産量では中国、韓国、インドなどに追い抜かれつつあり、日本の優位性が脅かされている。日本発信のフェライトが今後ともその地位を維持するためには、産官学による一層のたゆまぬ開発努力が必要とされている。

## ■ Abstract

Usually ceramics are including two categories of traditional and fine ceramics. Traditional ceramics such as cement, porcelain, glass and refractory are prepared using natural resources. On the other hand, fine ceramics are obtained by highly refined raw material, rigorously controlled composition and strictly regulated forming and sintering.

Electronic ceramics are typical fine ceramics and defined as ceramics which display magnetic, insulating, dielectric, piezoelectric and semi-conducting properties which are useful in the production of electronic devices.

Among electronic ceramics, ferrites are chosen because they are invented in 1932 by two Japanese scientists and have fundamental and epoch making technologies in electronic device applications. This article provides a comprehensive survey of the historical development of the science and technology of ferrite materials as well as applications of the ferrites.

In 75 years since ferrites were developed, Japan could lead the world in production and technology. Especially, the public attention was thoroughly aroused as to the scientific and technological importance of ferrites after the 1950s to 1980s, because the new applications such as radio, television, carrier telephony, computer circuitry and microwave devices were rapidly expanding.

Recently, the production of ferrites in China, Korea and India are increasing year by year, so it may be difficult for Japanese companies to maintain their advantages in the ferrite industry. In order to keep them, further continuing and persistent efforts covering government, industry and academy are strongly required.

## ■ Profile

一ノ瀬 昇 *Noboru Ichinose*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

|       |      |                  |
|-------|------|------------------|
| 昭和10年 | 9月8日 | 生れ               |
| 昭和34年 | 3月   | 早稲田大学理工学部応用物理学卒業 |
| 同年    | 4月   | (株)東芝入社          |
| 昭和42年 | 10月  | 理学博士(早稲田大学)      |
| 昭和60年 | 3月   | (株)東芝退職          |
| 昭和60年 | 4月   | 早稲田大学理工学部教授      |
| 平成18年 | 4月   | 同学名誉教授           |

## ■ Contents

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 1. はじめに                 | 149 |
| 2. フェライトの概要             | 150 |
| 3. フェライトの基礎             | 155 |
| 4. フェライトの製造法            | 158 |
| 5. 各種フェライト材料            | 164 |
| 6. フェライトの応用             | 169 |
| 7. フェライトの特殊な応用          | 176 |
| 8. フェライトの技術発展と高機能化      | 184 |
| 9. フェライト技術の系統化          | 205 |
| 10. 考察とまとめ              | 208 |
| 11. 登録資料候補一覧            | 209 |
| 付録 JIS 用語集 (JIS R 1600) | 210 |

# 1 はじめに

経済産業省の窯業・建材統計を見ると 2007 年のファインセラミックスの販売金額は前年比 108.7%の 6121 億 6600 万円と 6000 億円を突破している。なお、窯業・建材および生体用部材は事業所が単独あるいは少数であることなどの理由から、調査事業所が秘匿しているため非公開である。

日本ファインセラミックス協会の産業動向調査によれば、ファインセラミックス部材の 2006 年生産高は 2 兆 2333 億円であり、窯業・建材統計の約 4 倍の規模である。部材別に見ると、光磁気・光学用部材が最も多く 64%（1 兆 4299 億円）を占めている。熱的・半導体関連および化学・生体・生物関連の増加傾向が続いており、2006 年実績では各々 10%前後まで拡大している。2007 年の見通しについては、前年比 105.4%の 2 兆 3544 億円と、4 年連続で過去最高を更新する見通しである。部材別では、電磁気・光学用が前年比 105.7%と増加する見通しである<sup>1)</sup>。

日本ファインセラミックス協会によれば 2007 年のファインセラミックスの生産高見通しでは、電磁気・光学用途はコンデンサ素子や圧電体が好調に推移したため誘電性・圧電性部材が 2 桁の伸びになる他、集積回路用パッケージを主体とする絶縁性部材も堅調に推移する見通しである。

上記のようにファインセラミックスの生産額は順調

に伸びており、特にエレクトロニクセラミックスの伸長が著しい。エレクトロニクセラミックスの代表格であるフェライトは誘電・圧電部材ほどの伸長は期待できないが、積層フェライト部品や高性能フェライト磁石などに新しい産業展開が期待されている。

本調査では、第 2 章でフェライトの概要を述べ、第 3 章ではフェライトの基礎について概観した。第 4 章ではフェライトの製造方法について紹介した。フェライトにはソフトとハードがあるが、第 5 章では各種のフェライトについて言及している。第 6 章と第 7 章はフェライトの応用について述べているが一般的な応用とやや特殊な応用とに分けて紹介している。

第 8 章は本調査の主要部分で、フェライトの技術発展と高機能化と題して、フェライトの生産推移、日本のフェライト産業の強み、弱み、フェライトの誕生から実用化への道のり等について述べた。第 9 章ではフェライト技術の系統化をソフトとハードに分けて行った。第 10 章では考察とまとめを行っており、最後に学協会、企業の協力を得て関連資料の所在確認を行い、登録資料候補を選定することとした。

## 〈参考資料〉

1) CMC 編集部：機能材料 Vol. 28 No. 12 P68 (2008)

## 2 | フェライトの概要

### 2.1 フェライトの発展の経緯

フェライトの最も単純なものはマグネタイト  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$  であって、天然に存在するマグネタイト、すなわち磁鉄鉱はすでに 2500 年以上も前に lodestone として鉄片をひきつける性質のあることが知られていた。そしてこれが人類に磁気的な現象を教えてくれた最初の物質であった。しかしながら磁性酸化物の科学研究は 19 世紀後半から始まる。すなわち 1878 年に初めて K. List は MO (M=Mg, Mn, Zn, Ni, Cu) と  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  から磁性酸化物がつくられることを知った。また 1896 年 P. Weiss は、マグネタイトの磁性を測定したところ、飽和値がニッケルのそれとほぼ等しく、キュリー温度が鉄とニッケルとの中間の値を示すことを発見した。S. Hilpert は 1909 年にマグネタイトをはじめ、他のフェライトの固有抵抗が鉄より非常に大きいことに着目して高周波磁心としての最初の特許を得たが、その磁心の透磁率は相当低いものであった。時期的に見ればちょうどこの頃磁性材料中の大宗である珪素鋼板が工業的に製産されはじめたのである。その後 1928 年ごろ H. Forestier は化合物  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  の存在を確かめ、 $\text{MFe}_2\text{O}_4$  (M=Cu, Ni, Mg, Sr, Ba, Pb, Ca, Cd) の組成の材料をつくり、磁化とキュリー温度を測定した。こうしてフェライトに関する化学、物理的研究は年とともに盛んとなり、今日の発展の基礎が徐々に培われていったのである。

フェライトの発展の経緯を表 2.1 に示したが、1930 年頃から、わが国の加藤与五郎、武井武両博士は Co フェライトとマグネタイトとの固溶体が極めて大きな保磁力を有し、磁場冷却処理を施せばさらに磁石特性が改良されることを発見し、この材料に OP 磁石という名称を与えた<sup>1),2)</sup>。これはフェライト材料の最初の実用化された製品として、しかも現在なおこの性能をはるかに上回るような酸化物磁石が出現しないという点で大きな意義が認められる。一方両氏は Cu フェライトあるいは Zn フェライトを固溶する数種のフェライトの研究の結果、1932 年にオキサイドコアを発明し、ラジオ周波数帯で用いられる各種線輪の磁心に利用して高周波用フェライトの先べんをつけたことは周知のとおりである<sup>3)</sup>。このころオランダではフィリップス社の研究者達によって  $\text{MO-Fe}_2\text{O}_3$  (M=Mn, Cu, Ni, Mg) 二成分系の組織と焼成条件との関係が磁

氣的、X 線的に詳細に研究され、ついに 1941 年に J. L. Snoek は高周波磁心材料としての性能を確立、向上し、かつ均質性を増加するために必要な焼成条件を明らかにした。1947 年に至って従来得られなかった非常に高い初透磁率をフェライトに付与させることに成功した。そして低周波から数十 MHz までの領域をおおう磁心材料 Ferroxcube を生み出し、磁性材料分野におけるフェライトの位置を画期的に高揚した<sup>4)</sup>。

Ferroxcube の出現以来、世界各国におけるフェライトの基礎的研究や応用的研究は急速に進み、新しい応用面が続々と開拓されつつある。中でも 1950 年以来マイクロ波工学におけるフェライトのファラデー効果の利用と、電子計算機における記憶回路や磁気スイッチの磁心としての角形ヒステリシス・フェライトの利用、およびわが国で発明されたパラメトロン素子としての利用が注目されるようになった。

スピネル型フェライト以外の幾多の酸化物磁性材料の研究もますます盛んとなり、1951 年に Gorter らが OP 磁石にまさる永久磁石材料としてマグネトプランバイト型の Ferroxdure (Ba 系フェライト) を開発<sup>5)</sup>し、1956 年には Jonker らが高周波磁心材料として Ferroxcube より 1 桁以上高い周波数まで使用可能な Ferroxlana ( $\text{BaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MO}$  系、M=Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Mg)<sup>6)</sup>をフィリップス社において発見した。さらに 1956 年 Bertaut、Forrat がガーネット型結晶のイットリウム-鉄ガーネット ( $3\text{Y}_2\text{O}_3\text{-5Fe}_2\text{O}_3$ ) を発見<sup>7)</sup>以来、この一連の強磁性酸化物は強磁性マイクロ波増幅器の素子として有望視されるようになった。

フェライトが工業的に生産されたのは 1935 (昭和 10) 年頃であり、先に述べた加藤・武井両氏による高周波磁心としての Cu-Zn 系フェライトが、また磁石材料としての Co-Fe 系フェライトが、いずれも国内で販売された。しかし、これに対する国内からの反響は乏しく、むしろ海外で注目され、第二次世界大戦中は諸外国、特にオランダで研究が続けられ、今日最も広い用途をもつ Mn-Zn 系フェライトが開発されるなど目ざましい進展をとげ、戦後これらの技術が逆輸入されることとなった。これは、八木アンテナ、エサキ・ダイオードなどの場合と同様、自国で開発された独自の技術や発明には冷淡でそれが海外で注目され、定評を得たのちに初めて採用するといった悲しむべき習性の表われとも言うべき現象がここでも起きている。

## 2.2 フェライトの分類<sup>8)</sup>

### (1) 組成、結晶形による分類

フェライトは $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を主成分とする磁性酸化物であり、その化学組成と結晶形は磁気特性を支配する基本的な要素として重視される。表2.2には実用フェライトの基本となる代表的な単元フェライトの例を示した。化学式が $\text{Me}^{2+}\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ で表わされるスピネル型結晶、 $\text{M}^{2+}\text{O}\cdot6\text{Fe}_2\text{O}_3$ で表わされるマグネトプランバイト（六方晶）型結晶、 $\text{R}_3\text{FeO}_{12}$ で表わされるガーネット型結晶などに分類される。ここで $\text{Me}^{2+}$ は $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ など鉄族遷移金属、 $\text{M}^{2+}$ は $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ などアルカリ土類金属、 $\text{R}$ は $\text{Y}^{3+}$ 、 $\text{Gd}^{3+}$ 、 $\text{Sm}^{3+}$ など3価の希土類イオンを示す。

表中、 $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ や $\text{CdFe}_2\text{O}_4$ は反強磁性を示す非磁性フェライトであり、これらのフェライトの中では特殊なものであるが、例えば $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ は磁気特性の優れたNi-Zn系、Mn-Zn系など多元フェライトをつくるのに極めて重要な役割を果たすものである。結晶形と磁気特性の関係や異種フェライトの固溶効果などについては、別途改めて述べることにする。

### (2) 機能による分類

一般にフェライトに期待される最大の機能はもちろん磁気機能である。そして中でも最も特徴的なことは、金属磁性材料に比べて電気的な比抵抗が大きい（105倍以上）ために高い周波数領域で優れた磁気特性を示すことである。

さらに組成系の選択によっては、優れたジャイロ磁気特性や電波吸収特性やさらに光学特性も得ることができる。したがって、きわめて多様性のある材料とも言うことができる。

表2.3にはフェライトの磁氣的機能をはじめとする諸機能を示してある。この中には磁気に関係ない耐摩耗性、耐食性なども含まれているが、これらは主機能を補佐する意味において、しばしば重要な役割を果たすことがある。特に最近のように電子機器の小型化、高性能化を追求する過程においては、機械的特性や熱的特性など多面的な機能を求められることが多い。

### (3) 形態による分類

フェライトの形態には単結晶、多結晶、薄膜、非結晶などいろいろあるが、機能を十分に発揮するためには、材料の構造形態を目的に応じて選択あるいは制御する必要がある。また、場合によっては人為的に複合、生成するなどして、より良い材料の形態を整えてやることも重要である。表2.4にはこのような考え方でフェライトの形態が分類されている。まず第一にはこれらの形態を最も有効に活用できる用途を見出すこと、次いで目的意識を先行させてより特徴ある形態を求め、これらを新用途開発に結びつける必要がある。磁性粉体の形状に関しては、優れた針状、優れた平板状などを追求することが、高密度記録実現のための形態上の基本条件となる。表には一般的に対応する用途の分野を主に記入してあるが、今後進展が期待される生体分野などについても触れている。

以上、フェライトの物性にかかわる基本的事項を三つの要素、すなわち物質（基本組成と結晶形）、機能、形態に分類して示した。これら三要素は、フェライトの多様性を示すものであり、後述の応用の広さにもつながるものである。

### 〈参考文献〉

- 1) 加藤与五郎、武井武：日本特許 No. 110, 822 (1932)
- 2) 加藤与五郎、武井武：電気学会誌 Vol. 53 P408 (1933)
- 3) 加藤与五郎、武井武：日本特許 No. 98, 844 (1932)
- 4) J. L. Snoek : "New Development in Ferromagnetic Materials" Elsevier Pub. Co., New York (1947)
- 5) J. L. Went, G. W. Ratenan, E. W. Gorter and G. W. van Oosterhout : Philips Tech. Rev. Vol. 13 P194 (1951)
- 6) G. H. Jonker, H. P. J. Wign and P. B. Braun : Philips Tech. Rev. Vol. 18 P145 (1956/1957)
- 7) F. J. Bertaut and F. Forrat : Comp. Rend., Vol. 242 P382 (1956)
- 8) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦：“フェライト”丸善 (1986)



表 2.1 フェライトの発展の経緯

| 年 代             | ソフトフェライト                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | ハードフェライト                                                                                                                                                                                              |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1930<br>(昭和 5)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>東京工業大学の加藤与五郎、武井武両博士によりフェライトが見出される('30)</li> <li>日本でフェライト(Cu-Zn(銅・亜鉛)系フェライト)が工業化(世界初)される('37)</li> <li>フェライトがダストコア(カーボニール・鉄)の代用として無線機の装荷線輪用に使用される('37)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>0P 磁石が工業化される('35)</li> </ul>                                                                                                                                   |
| 1940<br>(昭和 15) | <ul style="list-style-type: none"> <li>フェライトが、ラジオの<math>\mu</math>(ミュー)同調用と高周波コイルに使用される('38)</li> <li>フェロックスキューブ型フェライトが見出される('47)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                       |
| 1950<br>(昭和 25) | <ul style="list-style-type: none"> <li>フェライトがポータブルラジオのアンテナに使用され、需要が急増する('52)</li> <li>白黒テレビのフライバックトランスおよび偏向ヨークコアの開発および販売が開始される('51~55)</li> <li>テレビの増産計画推進により、フライバックトランスおよび偏向ヨークコアの需要が伸びる('55)</li> <li>電話搬送機器にフェライトが使用される('55)</li> <li>パラメトロン電子計算機用のフェライトが開発される('55)</li> <li>ガーネット形フェライトが見出される('56)</li> </ul>                                                                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>フェロックスデュア形フェライトが見出される('51)</li> <li>Ba 系フェライト磁石が商品化される('54)</li> <li>フェロックスプレーナ形フェライトが見出される('56)</li> <li>わが国でフィリップスの特許を使用した Ba 系フェライト磁石が量産される('57)</li> </ul> |
| 1960<br>(昭和 35) | <ul style="list-style-type: none"> <li>電話搬送機器用に高安定フェライト材が開発される('60)</li> <li>電話搬送機器の LC フィルタ用に低損失フェライト材が開発される('61)</li> <li>マイクロ波用フェライト材が開発され、その応用製品であるサーキュレータが UHF テレビ用チューナに使用される('63)</li> <li>初透磁率 10,000 のフェライト材が開発される('64)</li> <li>テープレコーダ用のフェライトヘッドが実用化される('64)</li> <li>カラーテレビのフライバックトランスおよび偏向ヨークコアの開発、販売が開始される('65)</li> <li>単結晶フェライトが工業化される('65)</li> <li>魚群探知機、超音波洗浄機用磁歪振動子画開発される('67)</li> <li>フェライトによる電波吸収体が開発される('68)</li> <li>カラーテレビのフライバックトランスおよび偏向ヨークコアの需要が急増する('68)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Sr 系等方性磁石が製品化される('60)</li> <li>Ba 系異方性磁石が製品化される('61)</li> <li>Sr 系異方性磁石が製品化される('66)</li> <li>Sm-Co 系希土類磁石が見出される('66)</li> </ul>                                |

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                 |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1970<br>(昭和 45)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・初の国際フェライト会議(ICF)が開催される('70)、ICF-2 が開催される('76)</li> <li>・電源トランス用のフェライトが開発される('75)</li> <li>・VTR 用のロータリートランスコア、映像記録・再生用のフェライトヘッドが開発される('76)</li> <li>・TV ゴースト防止用の電波吸収体フェライトタイルが開発される('79)</li> <li>・複写機トナー用の磁性粉が開発される('79)</li> <li>・FDD 用フェライトヘッドの需要が伸びる('79)</li> </ul>                                                                      |                                                                                                                 |
| 1980<br>(昭和 55)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ICF-3 が開催される('80)</li> <li>・複写機用のフェライトキャリアが開発される('80)</li> <li>・EMC 用フェライトチップが開発される('84)</li> <li>・ICF-4 が開催される('84)</li> <li>・カラーディスプレイモニタのフライバックトランス、偏向ヨーク用のフェライト市場が形成される('85)</li> <li>・インバータ式照明のフェライトの需要が増大する('86)</li> <li>・液晶バックライト用の薄型フェライトトランスが実用化される('86)</li> <li>・EMC 用のフェライト市場が形成される('88)</li> <li>・ICF-5 が開催される('89)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>・プラスチック磁石が商品化される('80)</li> <li>・Nd-Fe-B 系磁石が見出される('84)</li> </ul>        |
| 1990<br>(平成 2 年) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・東京都庁(新宿)のテレビゴースト防止用にフェライト電波吸収材が採用される('90)</li> <li>・フェライトの国内生産金額が 1,000 億円を超える('91)</li> <li>・ICF-6 が開催される('92)</li> <li>・光磁気ヘッドが実用化される('93)</li> <li>・日系メーカーのフェライト海外生産重量が 2 万トンを超える('95)</li> <li>・初透磁率 25,000 のフェライトが開発される('95)</li> <li>・ICF-7 が開催される('96)</li> </ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・La ドープ Sr 系磁石が見出される('90)</li> <li>・La ドープ Sr 系磁石が商品化される('95)</li> </ul> |
| 2000<br>(平成12年)  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ICF-8 が開催される('00)</li> <li>・ICF-9 が開催される('04)</li> <li>・ICF-10 が開催される('08)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                 |

表 2.2 フェライトの種類<sup>8)</sup>

| 組 成                                                | 飽和磁化<br>[mT] | キュリー温度<br>[°C] | 磁 性   | 結 晶 形       |
|----------------------------------------------------|--------------|----------------|-------|-------------|
| MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 520          | 300            | フェリ磁性 | スピネル型       |
| FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 600          | 585            | 〃     | 〃           |
| NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 340          | 590            | 〃     | 〃           |
| CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 500          | 520            | 〃     | 〃           |
| CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 170          | 455            | 〃     | 〃           |
| MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 140          | 440            | 〃     | 〃           |
| Li <sub>0.5</sub> Fe <sub>2.5</sub> O <sub>4</sub> | 390          | 670            | 〃     | 〃           |
| γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | 520          | 575            | 〃     | 〃           |
| BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                 | 480          | 450            | 〃     | マグネトプランバイト型 |
| SrFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>                 | 480          | 453            | 〃     | 〃           |
| Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>     | 170          | 287            | 〃     | ガーネット型      |
| Lu <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>    | 120          | 267            | 〃     | 〃           |
| ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   |              |                | 反強磁性  | スピネル型       |
| CdFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   |              |                | 反強磁性  | 〃           |

表 2.3 機能による分類<sup>8)</sup>

| 機 能 | 主 な 特 性                                           |
|-----|---------------------------------------------------|
| 磁氣的 | 軟磁性、硬磁性、半硬磁性(記録、記憶ほか)、磁歪特性、ジャイロ磁気特性、磁区制御特性、電波吸収特性 |
| 電氣的 | 高比抵抗、導電性(耐食)                                      |
| 機械的 | 耐摩耗性、寸法安定性、精密加工特性、高密度、高硬度                         |
| 化学的 | 耐食性、耐湿性、接合性(ガラスなどと)                               |
| 熱 的 | 熱磁気特性、耐熱性、低熱膨張                                    |
| 光学的 | 光磁気特性、光透過性                                        |
| その他 | 耐放射線特性                                            |

表 2.4 形態による分類と用途<sup>8)</sup>

| 形 態           | 主 な 用 途 他                                          |
|---------------|----------------------------------------------------|
| 単結晶           | 磁気ヘッド、バブルデバイス、マイクロ波素子、光素子                          |
| 多結晶           | 磁心材料、磁石材料、磁気ヘッド、電波吸収体、磁歪材料、非線形素子、マイクロ波素子、磁性基板、電極   |
| 複合体           | 磁気テープ、磁気ディスク、磁気カード、圧粉磁心、複合磁石、電波吸収体、防震材             |
| 薄 膜           | 磁気ディスク、マイクロ波 IC、バブルデバイス                            |
| 粉 体           | 磁性キャリア、磁性トナー、各種粉体材料、磁気分離                           |
| 流 体           | 磁性インク、磁性流体                                         |
| 非晶質           | 光磁気記録媒体 <sup>a)</sup>                              |
| フェライト<br>生成過程 | 廃水処理                                               |
| 生体(内)         | 生物センサ <sup>a)</sup> (特殊バクテリア、鳩、鮭など)、加温治療(ハイパーサーミア) |

a) 可能性

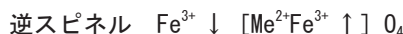
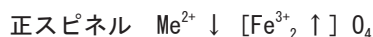


# 3 フェライトの基礎

## 3.1 フェライトの結晶構造<sup>1),2)</sup>

### (1) スピネル型

よく知られているように、高周波用磁性材料として実用化され重要な軟質磁性材料のスピネル型フェライトは、天然鉱物スピネル ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) と同型の結晶構造を有するフェライトの総称で、立方晶系に属する。その構造を図 3.1 に示す。(a) は単位胞の 4 分の 1 を図示したものである。格子定数は  $8.3 \sim 8.7 \text{ \AA}$  である。化学式は  $\text{Me}^{2+}\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  または  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$  で表わされ、単位胞は  $8\text{MeFe}_2\text{O}_4$  からなる。ここで  $\text{Me}^{2+}$  は  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$  などである。イオン半径の大きな酸素イオン ( $1.40 \text{ \AA}$ ) が最密立方格子を形成し、単位胞の中には 24 個の金属イオン ( $5 \mu\text{B}$  をもつ  $\text{Fe}^{3+}$  イオンと  $\text{Me}^{2+}$  イオン) と 32 個の酸素イオンが含まれる。金属イオンの入る位置は A、B の 2 種類あり、その数は A が 8 箇所、B が 16 箇所である。したがって、B の位置の数は A の 2 倍ある。A 位置は 4 個の酸素が構成する四面体に囲まれ、B 位置は 6 個の酸素が構成する八面体に囲まれている (図 3.1)。A 位置、B 位置はそれぞれ 8a 位置、16d 位置とも呼ばれる。2 価のイオン ( $\text{Me}^{2+}$ ) が A 位置に入るのを正スピネル、B 位置に入るのを逆スピネルと言う。両者を化学式で区別するのに、B 位置を [ ] に入れて



と表わすことが多い。 $\text{Me}^{2+}$  として適当なイオン半径は  $0.6 \sim 0.8 \text{ \AA}$  程度であり、Cd、Zn は正スピネルの位置、Fe、Co、Ni などは逆スピネルの位置、Mn は 80% 正スピネルの位置に入る。このように金属イオンが選択的な位置をとり、A と B の金属イオンのスピンは超交換相互作用<sup>3),4)</sup> によって矢印に示すように反平行になっている<sup>5)</sup>。

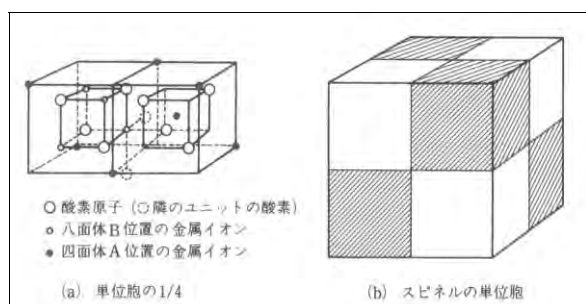


図 3.1 スピネルの結晶構造<sup>1)</sup>

### (2) マグネトプラムバイト型

永久磁石材料として用いられている  $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  すなわち  $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$  ( $\text{M} = \text{Ba}, \text{Pb}, \text{Sr}$ ) はマグネトプラムバイト (magnetoplumbite) 型結晶で、六方晶系  $\text{P6}_3/\text{mmc}$  空間群に属する。この結晶型は古くから磁性酸化物として知られているマグネトプラムバイト鉱 (その分子式は  $\text{Pb}_2\text{Fe}_{15}\text{Mn}_7 (\text{Al}, \text{Ti})_{12}\text{O}_{38}$  または  $\text{Pb} (\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Al}, \text{Ti})_{12}\text{O}_{19}$ ) に基づいて命名された。理想的なマグネトプラムバイト構造は 図 3.2 に示したように、単位胞に 2 分子を含んでいる。酸素は最密六方格子を形成するが、そのうちの二つが Ba イオンで置換されている。図 3.2 (a) を単純化した模型が 図 3.2 (b) で、図からわかるようにスピネル形配置のブロックの間に Ba 層がはさまれているような構造を示す。スピネルブロックはスピネル格子の  $[111]$  方向を垂直の軸とした構造であって、9 個の  $\text{Fe}^{3+}$ 、16 個の  $\text{O}^{2-}$  イオンが存在している。 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  のイオン半径はそれぞれ  $1.43, 1.32, 1.27 \text{ \AA}$  である。フィリップス社で開発された Ferroxdure と呼ばれている永久磁石は  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  や  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  を主成分としている。

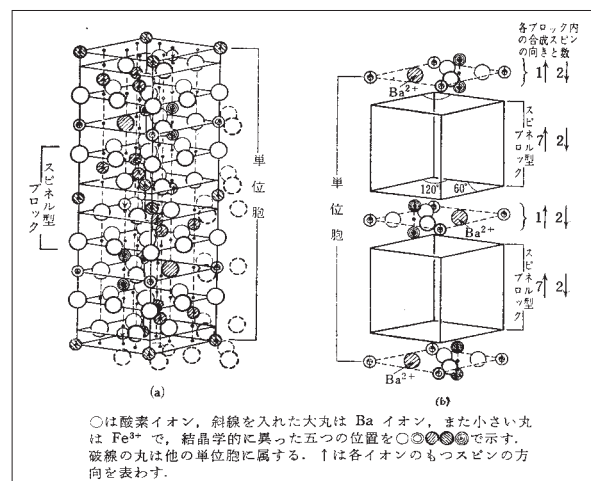
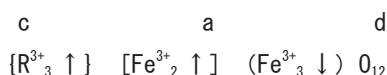


図 3.2  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$  のマグネトプラムバイトの構造<sup>1)</sup>

$\text{Fe}^{3+}$  イオンの位置はその周囲の酸素イオンの配置の違いから結晶学的に五つの異なった位置に入る。図 3.2 においてはこれらを区別して示してある。すなわち  $\text{Ba}^{2+}$  と同じ層の ◎印の  $\text{Fe}^{3+}$  イオンは 5 個の酸素イオンの形成する trigonal bipyramid で囲まれている。●、●は結晶学的には異なる 3 個の octahedral site を表わす。また ○ は tetrahedral site である。c 軸 ( $23.17 \text{ \AA}$ ) が a 軸 ( $5.9 \text{ \AA}$ ) に比して非常に長いことが特徴である。

### (3) ガーネット型

1 Å 程度の比較的大きいイオン半径をもつ3価の希土類酸化物 ( $R_2O_3$ ) と  $Fe_2O_3$  とからなるフェライトで、 $3R^{2+}_2O_3 \cdot 5Fe^{2+}_2O_3$  または  $R_3Fe_5O_{12}$  の一般式で表わされるものがガーネット型フェライトである。単元のガーネット形フェライトをつくるRとしてはY, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Er, Yb, Luがある。この結晶は天然のザクロ石 ( $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ ) と同型の対称性をもつ立方晶系に属する。単位胞は8化学式からなり160個のイオンを含み、かなり複雑な構造をとる。その結晶構造を図3.3に示す。最もイオン半径の大きい  $O^{2-}$  (1.40 Å) が体心立方構造をつくり、陽イオン配置は3種類ある。イオン半径の小さい  $Fe^{3+}$  イオン (0.60 Å) の入る位置はa, dの2箇所、 $R^{3+}$  の入る位置はcの1箇所である。化学式は、Gd, Tb, Dy, Ho, Tm, Ybのような4f電子が7以上入った希土類ガーネットに対し、



で表わされる。単位胞中に  $Fe^{3+}$  は40個あり、八面体6配位の16aに16個、4面体4配位の24dに24個占める。 $R^{3+}$  (0.99 ~ 1.13 Å) はイオン半径が大きいので  $Fe^{3+}$  と置換するには大きすぎ、 $O^{2-}$  と置換するには小さすぎる。そこで、スピネル型にはなかった特別な格子点である8個の  $O^{2-}$  に囲まれた十二面体8配位の24c位置をとる。

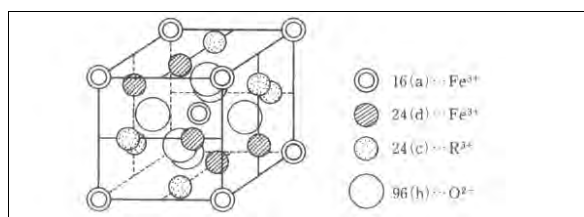
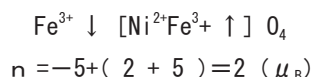


図3.3 ガーネット型の結晶構造<sup>1)</sup>(単位胞の1/8)  
酸素の位置は6個のみ記入してある

## 3.2 フェライトの磁性

スピネル型フェライトの磁化は容易に計算することができる。例えば

Ni フェライト1化学式当りの磁気モーメント ( $n \mu_B$ ) を計算してみると、逆スピネル構造をとるとして



と求まる。表3.1には単元フェライトの1分子当り

の飽和磁化を示したが、各々逆スピネル構造をとるとした計算値が実測値とよく合うことがわかる。

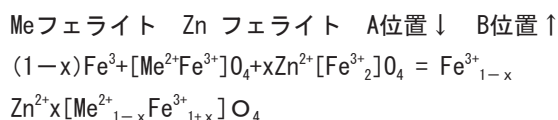
表3.1 単元フェライトの1分子当りの飽和磁化<sup>1)</sup>  
 $M_s$  (ボーア磁子単位)

| フェライト                                        | $M_{BS} - M_{AS}$   | $M_s$ 実測値 |
|----------------------------------------------|---------------------|-----------|
| $\vec{Fe}[\vec{Mn} \vec{Fe}]O_4^*$           | $(5+5) - 5 = 5$     | 5.0       |
| $\vec{Fe}[\vec{Fe}^{2+} \vec{Fe}]O_4$        | $(4+5) - 5 = 4$     | 4.2       |
| $\vec{Fe}[\vec{Co} \vec{Fe}]O_4$             | $(3+5) - 5 = 3$     | 3.3       |
| $\vec{Fe}[\vec{Ni} \vec{Fe}]O_4$             | $(2+5) - 5 = 2$     | 2.3       |
| $\vec{Fe}[\vec{Cu} \vec{Fe}]O_4$             | $(1+5) - 5 = 1$     | 1.3       |
| $\vec{Fe}[\vec{Mg} \vec{Fe}]O_4$             | $(0+5) - 5 = 0$     | 1.1       |
| $\vec{Fe}[\vec{Li}_{0.5} \vec{Fe}_{1.5}]O_4$ | $(0+7.5) - 5 = 2.5$ | 2.6       |
| Zn $[\vec{Fe} \vec{Fe}]O_4^{**}$             | $(5-5) - 0 = 0$     | 0         |
| Cd $[\vec{Fe} \vec{Fe}]O_4^{**}$             | $(5-5) - 0 = 0$     | 0         |

\* 正スピネルに近い構造であるが、 $M_{BS} - M_{AS}$  の値に変わりはない。

\*\* Zn, Cd フェライトでは (A-B) 相互作用がないから、(B-B) 間の弱い負の相互作用によってBイオンのスピンは逆平行になる。

結晶構造が同じで格子定数のほぼ等しい同系化合物は、容易に固溶体になる。したがって、2種類の単元フェライトは任意の割合で混ざり連続固溶体となる。イオンの種類によって飽和磁化、結晶磁気異方性定数、磁歪の値を変えられるから、実用スピネル型フェライトは固溶体として用いられることが多い。特に重要なのはZn フェライトなどの正スピネルとNi フェライトなどの逆スピネルとの固溶体である。Me フェライト (1-x) にZn フェライト (x) を固溶させたMe-Zn フェライトの化学式は次のようになる。



このようにZnはA位置に入りやすいので、A位置にある  $Fe^{3+}$  イオンがB位置に押し込まれる。その結果、 $Me^{2+}$  の磁気モーメントを  $m_M \mu_B$  とすれば、全体の磁気モーメント ( $n \mu_B$ ) は  $\mu_B$  単位で、

A位置 ↓ B位置 ↑ B位置 ↑

$n = -5(1-x) + m_M(1-x) + 5(1+x) = (10-m_M)x + m_M$  となり、 $m_M=0$  である  $Zn^{2+}$  イオンからなるZn フェライト ( $x=1$ ) が単純な理論上では最大値  $10 \mu_B$  を示す。そこで非磁性イオン  $Zn^{2+}$  でMeを置換することで磁気モーメントが増加する。種々のスピネル型フェライト (Me = Mn, Fe, Co, Ni, Mg) とZnフェライトとの固溶系の実測例を図3.4に示す。この図でxが増加するのに伴いモーメントは増加するが破線で示した理論値からずれて、 $x > 0.4$  では磁気モーメントの減少が見られる。これは、Znが増すとA位置の磁気モーメントがうすまることによってB位置の各種イオンのスピン間の相互作用が大きくなり、反平行成分が増えるためである。そして、Znフェライトでは反強磁性体となる。Znフェライトの固溶は飽

和磁化を増加させる効果があるため実用フェライトに利用されている。また、 $x$ の増加と共にキュリー温度( $T_c$ )が低下するので、室温での磁化は $x = 0.1 \sim 0.4$ 付近で最大値をとり、それ以上の領域ではむしろ低下する。

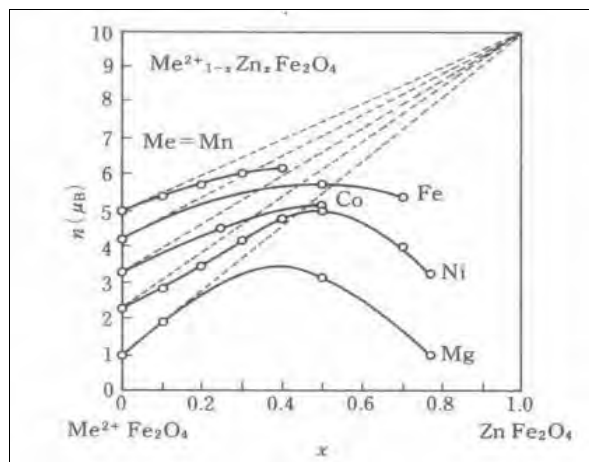


図 3.4 Me フェライトに Zn フェライトを固溶させた  $\text{Me}^{2+}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$  フィラメントの 0 K での磁気モーメント<sup>1)</sup>

マグネトプラムバイト型の磁化も容易に計算できる。磁気構造を化学式 ( $\text{BaFe}_2\text{O}_{19}$ ) について考えてみる。磁性をもつのは 12 個の  $\text{Fe}^{3+}$  ( $5 \mu_B$ ) で、スピネル原子層 (S) には上向きが 7 個、下向きが 2 個、Ba 原子層 (R) では上向きが 1 個、下向きが 2 個となる。したがって  $n = (7 - 2 + 1 - 2) \times 5 = 20 (\mu_B)$  となり、実測値  $22 \mu_B$  とよく一致する。

ガーネット型フェライトの磁気モーメントの値も Néel のフェリ磁性理論<sup>4)</sup>で説明できる。1 化学式についてみると上の化学式で示したように、24d の 3 個の  $\text{Fe}^{3+}$  と 16a の 2 個の  $\text{Fe}^{3+}$  とが強い負の超交換相互作用によって反平行に配列する。そして、この差引の 1 個の  $\text{Fe}^{3+}$  に対して  $\text{R}^{3+}$  のモーメントがゆるく反平行に結合している。 $\text{Fe}^{3+}$  のモーメントは  $5 \mu_B$  であるので、1 化学式 ( $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ ) 当りのモーメント ( $n \mu_B$ ) は希土類イオン 1 個のモーメントを  $m_R$  とすると、

$$n = (3 - 2) \times 5 - 3m_R = 5 - 3m_R \quad (\mu_B) \quad \text{となる。}$$

イットリウム鉄ガーネット (YIG) は高周波損失が著しく小さいことを特徴としマイクロ波材料として用いられている。その磁気モーメントは  $\text{Y}^{3+}$  のモーメントが 0 のためフェリ磁性理論値の  $5 \mu_B$  に対し実測値  $5.0 \mu_B$  とよく一致する。

#### 〈参考文献〉

- 1) 七條祐三、佐藤斉：“フェライト” 日刊工業新聞社 (1959)
- 2) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦：“フェライト” 丸善 (1986)
- 3) H. Kramers: Physica Vol.1 P182 (1934)
- 4) P. W. Anderson: Phys. Rev. Vol. 79 P350 (1950)
- 5) L. Néel: Ann. Phys. (Paris) Vol.3 P137 (1948)

# 4 フェライトの製造法

## 4.1 一般的製造法<sup>1)</sup>

### (1) 概説

フェライトは、酸化鉄と他の2価金属の酸化物が化学的に結合してできている。したがって、フェライトをつくるには、酸化鉄と他の金属酸化物を混合し、化学反応を起こさせるために加熱すればよい。

現在行われているフェライトの製造法には、大別すると図4.1のように乾式法と湿式法の二つがある。乾式法では、金属の酸化物、または加熱によって容易に分解して酸化物をつくるような金属の化合物を機械的に混合し、これを高温で加熱する方法である。これに対して、湿式法は、フェライトをつくる金属の水溶性化合物を水に溶解して混合し、これにアルカリを加えることにより金属イオンを水酸化物として沈殿させ、これを脱水、乾燥後高温に加熱してフェライトをつくる方法である。

また沈殿した水酸化物を100℃前後に長時間保って、フェライト化の化学反応を水溶液中で行なう場合もある。湿式法では、水溶液を扱うので大きな容器が必要となったり、アルカリを用いてできた沈殿物をこし分けるなど手数がかかるので工業的製造法としては不向きである。

この他、原料となる金属酸化物を混合したのち、高温で溶かしあわせてフェライトを製造する方法、金属の化合物を混ぜ、可燃性のガスとともに細い穴からふき出してガスを燃焼させて、金属化合物を分解すると同時にフェライト化の化学反応を起こさせる噴射法、湿式法のようにして沈殿させた水酸化物を圧力がま中で加熱加圧して、低温で微粉末フェライトをつくる方法などの特殊な製造法がある。

しかし、均一な性能の製品を安価に量産するため、わが国では、工業的な製造法として、一般に乾式法が採られているので以下乾式法による製造工程を述べることにする。

### (2) 原料

原料中最も大量に使われる酸化鉄は、工業的には鋼板などを酸洗いした廃液を原料として得られる純度99.5%程度のものが使われている。最近商品化された、高性能フェライトでは、99.9%以上の純度でなければならないものもある。

原料のマンガンのとしては、一般に炭酸マンガンが用いられ、銅、ニッケル、コバルト、マグネシウム、亜鉛などは、市販の工業用純品酸化物で間にあう。使用する原料は、フェライトの種類、用途によって有害な不純物の種類、許される含有量などが異なるから、それぞれの目的に応じて採否を定める。

### (3) 混合

原料を目的の組成となるように秤量し、混合機で混ぜあわせる。原料がなるべく均一に、しかも早く混合するような適当な混合機が選ばれる。例えば、ニーダーとか、ブレンダーなどがある。また比較的少量の場合に混合と同時に粉碎もしたい場合にはボールミルが用いられる。

### (4) 仮焼成

仮焼成は、混合の終わった原料を適当な形に圧縮成形するか、粉末のままあるいは泥状として本焼成温度よ

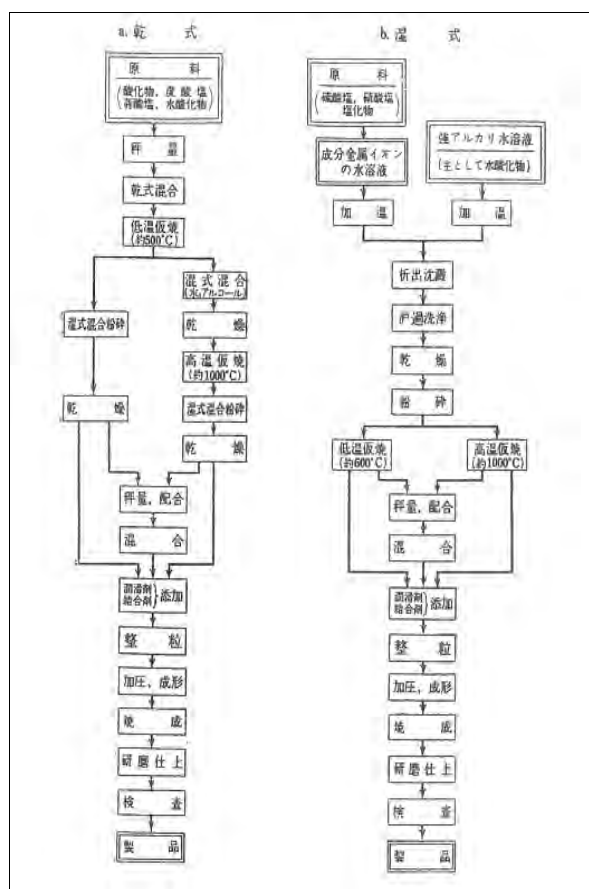


図4.1 フェライトの製造工程<sup>1)</sup>



りも 100 ～ 400℃ 低い温度で焼く工程である。その目的は、この段階でフェライト化の化学反応を進行させ、本焼成のときの成形を容易にし、焼きちぢみを減少させるためである。

また、加熱によって熱分解し、そのとき多量のガスを出すような化合物を原料として用いたときには、仮焼成によって熱分解を行わせ、本焼成のときにガスが出て種々の悪い影響を与えないようにする。

仮焼成の温度、時間などは、次の工程の粉碎および本焼成の条件と密接な関係をもっているから、製造上の重要な条件の一つである。仮焼成を、低温度と高温の 2 種類行い、両者を適当な割合に混合して本焼成の原料とすることもある。

## （５）粉碎

仮焼成された原料は、大きなかたまりとなっているので、ジョークラッシャ、アトマイザ、スタンプミルなどの粗粉碎機を用いてあらくだきをなし、次いで 1  $\mu$  以下に微粉碎する。微粉碎にはボールミルがよく用いられるが、最近、振動ミルとか、塔式粉碎機のように効率のよい粉碎機も用いられている。

粉碎の目的は、本焼成のとき、焼結反応が起こりやすいようにするほか、成形のとき、なるべく成形密度が高くなるような粒度分布にすることにある。

## （６）成形

微粉碎された材料粉末は、最終製品の形に成形される。

成形には、普通、金型を用い、大量に同一の形のものをつくる場合には、自動成形機を用いる。成形に際しては、粉末粒子間の摩擦を減じ、粒子の流れをよくして均一に成形されるように適当な粘着剤（PVA 水溶液がよく用いられている）と潤滑剤（ワックス、ステアリン酸塩など）を加えて球状の粒子をつくる。これを顆粒と呼び、その大きさは、成形品の大きさ、形状などによって異なるが、普通 0.1mm から 1mm くらいである。

成形圧力が高いほど成形密度が大きくなることは当然であるが、あまり高い圧力では成形品を型から抜き出すとひび割れが入ったりするので、普通 1 t/cm<sup>2</sup> 前後の圧力で成形する。

成形の際に注意しなければならないのは、成形品の各部分に均一に圧力がかかり、部分的な成形密度のばらつきがないようにすることであって、顆粒の大きさ、形、粘着剤の種類と量、金型設計、成形圧力などそれぞれ厳密に定めておかなければならない。圧力の不均

一があると、本焼成のとき焼きちぢみの大きさが不均一となって、ひび割れができたり、形がくるったりする。

## （７）焼成

焼成は、成形したものを高温に加熱してフェライト化の化学反応を完全に行なわせると同時に、焼結させて、密度と機械的強度を高める重要な工程である。

陶磁器などの窯業製品では、強度、密度、形状などを主として考慮するが、フェライトでは、この他に、磁気特性が重要である。

また、フェライトは酸化物なので、焼成している際に、周囲の酸素と化学反応を起こす。空気中で焼成した場合を考えれば、フェライトを構成する元素の種類と混合割合、焼成温度などにより、成成品から空気中に酸素を放出することもあり、また空気中の酸素を吸収することもある。

特性のよいフェライトを得るには、フェライト中の酸素の量を最適の値にしなければならないので、焼成の際に周囲の酸素の圧力を変えて目的を達している。これを焼成雰囲気制御と言って、高性能のフェライトをつくるためには必ず行われる方法である。

焼成のときに注意しなければならないことは、雰囲気制御の他加熱温度、加熱速度および時間、冷却の速度などである。温度をあまり早く上げれば、成成品の内部に含まれていた揮発成分、例えば粘着剤などが急に放出されるので、ひび割れができたり爆発することがある。

焼結後の製品の密度、結晶組織、結晶粒の大きさなどは、磁気特性と密接な関係をもっているが、これらは加熱時間と温度を適当な値に選んで制御する。適当な焼成条件を選べば、磁気特性に及ぼす焼成前の種々な影響をある程度まで除くことができる。フェライト焼成用の炉には、温度や焼成雰囲気制御が比較的容易な抵抗電気炉が使われることが多い。

発熱体は炭化ケイ素系のものが大部分であるが、比較的低温度で焼成できる銅亜鉛系フェライト用には、ニクロム発熱体を装備した電気炉が用いられることがある。温度は、普通 900 ～ 1,500℃ であって、フェライトの種類によって異なる。

大量生産用にはトンネル炉と言って、長い炉の一方の口から台車に乗せた成形ずみ原料を送り込み、他の口から焼成品が連続的に押出されてくる大型電気炉が用いられる。

## （８）研磨、加工

高透磁率材料を組立てて使用する E I 形、つぼ形磁心では、すりあわせ面でのすきまが問題となるので、焼成したままの磁心の表面をさらに加工して精密な平面としなければならない。

フェライトは、陶磁器に似て硬く、もろいので、切削加工はできず、もっぱら研磨加工によっている。研磨剤には、主としてカーボランダム (SiC) を使い、表面ラップ盤、表面研磨盤 (surface grinder) などで研磨して精密な平面とする。

## 4.2 特殊製造方法<sup>2)</sup>

先に、フェライトの一般的製造方法を述べた。ここでは、一般の乾式法では得難い高性能フェライトを得るための特殊製造法について述べる。一般にフェライトでは高密度なほど高性能であることが多い。また、セラミックスは従来、多結晶体を意味していたが結晶粒界のない単結晶フェライトも特殊な用途に用いられるようになった。そこで、ここでは特殊な製造方法として特殊成形、高密度焼結および単結晶の製造方法について述べる。

### (1) 特殊成形

フェライト焼結体の微細構造は、原料粉体の性質や焼成条件だけでなく、成形体の微細構造にも強く支配される。例えば、成形体中に存在する大きな気孔は焼結体においても残存してしまう。そこで、均一かつ高密度な焼結体を得るためには、均一かつ高密度な成形体を用意することが必要となる。このような成形体を通常のプレスを用いた一軸加圧成形で得ることは難しい。また、大型の製品や形状の複雑な製品の場合、成形時の歪やひび割れを発生しやすいので、一軸加圧成形よりも優れる特殊な成形法が採用されることがある。特殊な成形法としては、鑄込み成形、シート法、射出成形、冷間静水圧成形、爆発成形など、いろいろな方法が知られているが、ここでは射出成形と冷間静水圧成形について述べる。

#### (a) 射出成形

一般に射出成形はプラスチックの成形に広く利用されているが、セラミックスの分野においても、セラミックス材料と樹脂の複合製品や、窒化ケイ素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )、炭化ケイ素 (SiC) などの非酸化物セラミックスの成形に用いられている。フェライトの場合には、フェライト粉末と樹脂との複合製品についてのみ実用化されているが、射出成形では寸法精度のよい製品を得ることができるという特徴がある。焼成用の成形体として

は、寸法精度を向上させるために、樹脂量を少なくするのが望ましいが、型のすみずみまで充填するには流動性のよいことが必要であるから、樹脂を大幅に減らすことも難しい。この相反する条件をバランスよく満足させることがポイントである。成形用に加えられる有機物は、熱可塑性樹脂、可塑剤、分散剤、潤滑剤などであるがその量は 30 ~ 50 vol% にも達する。したがって、以後の脱脂工程 (有機物の熱分解工程) で完全に除去するような樹脂の選定が重要である。また、樹脂量を減らすには密に充填しやすい粉体であることが望ましい。

脱脂は、低温側から緩やかな温度勾配で昇温して、可塑剤、潤滑剤、樹脂の順に分解除去して行われる。昇温速度が大きいと、サンプルにひび割れが発生したり、分解ガスによる気泡が成形体内部に発生することがある。温度上昇に伴って熱可塑性のためにサンプルが変形することもあるので、脱脂条件を適正に選定しないと射出成形の高寸法精度という特徴は生かされ難くなる。

#### (b) 静水圧成形 (Cold Isostatic Press : CIP)

静水圧成形は、粉体あるいは予備成形した成形体をゴムのような弾性のある型に充填し、水などの液体を媒体として周囲から加圧して高密度成形体を得る方法である。一般に型にはゴム型を用いるところから、ラバープレスとも呼ばれている。静水圧による加圧であることから、均一な密度分布をもつ成形体 that 得られるというメリットがある。しかし、大型の成形体では均一性を確保することは難しく、流動性、充填性のよい粉体にしておくことが好ましい。ラバープレスでは、噴霧乾燥粉を用いることにより密度の均一性という特徴が十分に発揮され、通常  $3 \text{ t/cm}^2$  程度で加圧することができるので、一軸加圧成形よりも高密度の成形体を得ることができる。ただし、成形の寸法精度は必ずしも良いとは言えず、成形後あるいは焼成後に加工が必要である場合が多い。成形体のひび割れや破損は、ゴム型に充填した粉体を十分に脱気した後に加圧することによって解決できる。高密度であることが要求される磁気ヘッド用フェライトの製造に用いられているが生産性はあまり良くない。

### (2) 高密度焼結

焼結体の密度は、粉体の性質、成形体の微細構造だけでなく、焼成条件によっても大きな影響を受ける。通常、これら三つの条件を最適に設定しなければ高密度焼結体を得ることはできない。ここでは、高密度焼結体を得るための特殊な方法として代表的な真空焼



成、ホットプレス、熱間静水圧プレスについて述べる。

#### (a) 真空焼成

一般に焼結の初期段階では、気孔はほとんど連絡した開気孔すなわちオープンポアであり、粒子と粒子の接触しているネック部分が成長して太くなる。これに伴って粒子相互間の距離は減少し、緻密化が進行する。開気孔は焼結体の外表面まで連続しているので、気孔の体積が減少しても、中に含まれる気体は開気孔を通して外に逃れることができる。さらに緻密化が進んで焼結の後期段階になると、個々の気孔は次第に孤立していき、閉気孔すなわちクローズドポアが形成される。固相の成分原子の拡散によって、この閉気孔はさらに縮小していくが、気孔内に残された気体は逃げ場を失う。気体が固相内に容易に溶解する場合には問題は生じないが、溶解度が小さいと閉気孔内の気体圧力収縮に伴って増大し、閉気孔はそれ以上の収縮が困難となる。閉気孔中の気体が非常に小さな分子であるとか、あるいは、粒界中に容易に溶解できる気体であるならば、閉気孔の縮小速度は大きくなる可能性がある。 $\text{Si}_3\text{N}_4$  や  $\text{SiC}$  などの非酸化物系と違って、フェライトのような酸化物セラミックスでは、閉気孔内が真空であるかあるいは非常に低分圧の酸素であるならば、閉気孔の縮小速度は大きくなることが予想できる。このような観点から、閉気孔が生成する段階を真空雰囲気にする真空焼成法が高密度フェライトの製造に採用され成果を上げている。

真空焼成法には、焼成の全工程を真空にする方法と、閉気孔が生成終了するまでを真空にする方法の2通りあり、生産性の点では前者が優れている。しかしながら、真空焼成時のフェライト構成成分の蒸発（特に平衡蒸気圧の高い  $\text{ZnO}$  の蒸発）という問題もあるので、目的に応じて使い分けられる。ソフトフェライトの代表的材質である  $\text{Mn-Zn}$  系フェライトでは雰囲気中の酸素分圧を厳密に制御しなければ高い透磁率を得ることができないので、各温度帯域の減圧度を制御する複雑なプログラムが用いられている。真空焼成によって、 $\text{Mn-Zn}$  系フェライトでは理論密度の 99.5% 以上の緻密な焼結体を得ることができ、初透磁率が 20,000 を越える大きなものが得られている<sup>3)</sup>。

#### (b) ホットプレス

高温で加圧する、いわゆるホットプレス法（図 4.2 参照）が、各種のフェライトや強誘電体の焼結に試みられている。ホットプレス法は従来粉末冶金関係でパイトなどの焼結に使用されてきた方法で、粉体、粉末の焼結過程で強制的に外部から圧力を加えることにより、高密度の焼結体を作るなどの目的に適用される。

この方法がフェライトの焼結法として注目されるようになった主な理由は、通常の焼成法では得難い磁氣的、機械的に優れた性質のものが得られ、それが実用に耐えうるような段階にまで高められたことにある。また、この方法では透磁率や磁化機構の解明のための試料を容易につくることができるなどの利点があることも見逃せない。

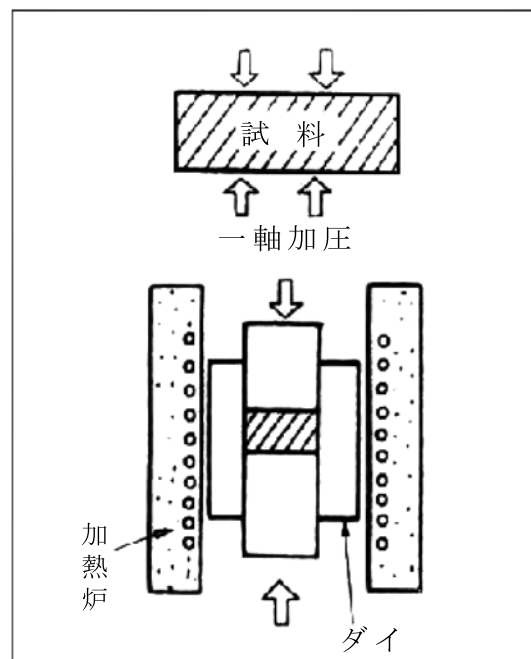


図 4.2 ホットプレス<sup>4)</sup>

一般に、ホットプレス法によれば比較的低い焼成温度でも焼結が進むので、粒子径が小さく、かつ理論密度に対して 99% 以上の高密度のフェライトを容易につくることができる。密度の高いフェライトでは空孔が極度に少なくなるため、材質が均一になるばかりでなく、機械的な強度も高く精密加工が容易になるなどの利点がある。さらに、透磁率などの磁氣的性質も改善されるので、VTR ヘッド用の材料として実用化されるようになった。また、マイクロ波ジャイレータ回路素子として使用されるフェライトでは高電力になるとスピン波と電磁波との相互作用によって非線形な損失を伴ってくる。このような損失はフェライトを高出力レーダーなどに用いる場合に大きな障害となっているが、粒径の小さなフェライトを使用することによって特性が改善されることが見出され、ホットプレスフェライトが有用になる範囲も拡大されつつある。しかし、ホットプレスで得られるフェライトは板状あるいは棒状の単純な型に限られ、また、量産が難しいなどの欠点があるため工業的にはそれほど一般化していないのが現状である。

ホットプレスは結晶の配向にも効果がある。Ba フェライトのような六方晶に属するフェライトでは室温における成形で結晶のc軸が若干加圧方向に揃えられるが、これをホットプレスすると結晶軸の配列がより促進される。高配向性フェライトを得るために 図 4.3 に示すような型を使用することにより変形を積極的に起こし、これを利用することによって、エネルギー積が 5 MJGoe を超える良質なフェライト磁石が得られている<sup>4)</sup>。

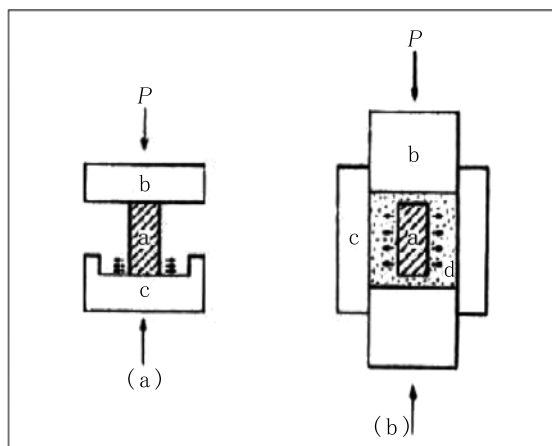


図 4.3 Ba フェライトをホットプレスするとき使用される型<sup>4)</sup>  
(a) 新しい方式の型 (b) 従来使用されてきた型  
a: フェライト b,c: アルミナ磁器 d: アルミナ粉

### (c) 熱間静水圧 (Hot Isostatic Press: HIP)<sup>5)</sup>

HIP は 図 4.4 のようには静水圧プレスを高温炉で行う方法である。圧力媒体として液体の代わりに Ar のような不活性ガスを用い、ゴム型の代わりに肉薄金属円筒が用いられる。HIP 法の特徴は、結晶粒子径が小さく、均一な微細構造の高密度 (理論密度の 99.95% 以上) 焼結体を得られることである。

フェライトでは、磁気ヘッド用の高密度 Mn-Zn フェライトや Ni-Zn フェライトの製造に利用されており、粉末の成形体ではなく、予備焼成した焼結体を HIP により高密度化している。HIP 処理の場合、高圧のガスで加圧するため、粉体の成形体ならば表面に開気孔がないようにシールする必要がある。予備焼成した焼結体を HIP 処理する場合にも、表面に開気孔があると高密度化しないので、焼結体は閉気孔のみが存在する程度にまで緻密化しておく必要があり、一般に理論密度の 95% 程度の焼結体を HIP 処理するのが普通である。また、予備焼成した焼結体の閉気孔中に固体に不溶性の気体が存在する場合には、HIP 処理において気孔の大幅な縮小が起こり、気孔中のガス圧が高くなり、HIP 処理後にひび割れを発生させることがある。

そこで、HIP 処理前の予備焼成には、普通、先に述べた真空焼成が施される。Mn-Zn フェライトの場合、HIP 処理は約 1200°C、1000 気圧程度で行われている。加圧ガスである Ar 中の酸素濃度は HIP 処理するフェライトの平衡酸素分圧よりかなり低く、HIP 処理中にフェライトから酸素の放出あるいは ZnO の蒸発が起こる。このような好ましくない現象を抑制するために、予備焼結体を Mn-Zn フェライト粉末中に埋め込んで HIP 処理が行われる。かつて磁気ヘッドは HIP 処理によるフェライトが使用されていたが、現在では殆んど用いられなくなった

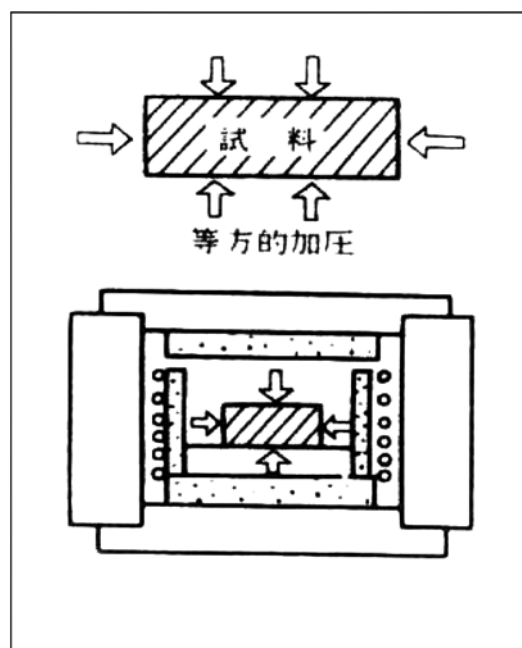


図 4.4 HIP 装置<sup>5)</sup>

### (3) 単結晶

単結晶の製造方法には、大別して気相法、液相法および固相法の 3 種類がある。気相法による単結晶製造法としては、蒸着法、スパッタ法、気相反応法などがあげられるが、いずれの方法も薄膜状の単結晶が得られ、バルク状の単結晶を得るのは困難である。液相法には溶液法と融液法とがあり、前者がフラックス法および水熱合成法である。後者の融液法では大形の単結晶を作製でき、現在最も普及した方法である。ブリッジマン法、チョクラルスキー法、ベルヌーイ法、ゾーンメルティング法などがこれに属する。この他にも浮遊帯域熔融 (フローティングゾーン) 法があるが、この方法では育成する単結晶の種類に応じてフラックスを用いることがある。固相法は、多結晶体を熱処理するときの粒成長を応用する方法で、グレイングロース法とも呼ばれる。フェライトの場合、単結晶として使

用されているのは主としてスピネル型の Mn-Zn フェライトおよびガーネット型の YIG（イットリウム鉄ガーネット）である。中でも Mn-Zn フェライトは大型の単結晶を作成することが可能で VTR（ビデオテープレコーダー）用の磁気ヘッド素材として多用されている。ここでは代表的なフェライト単結晶作成法としてブリッジマン法と浮遊帯域溶融法を選んで述べることにする。

#### (a) ブリッジマン法<sup>6)</sup>

ブリッジマン法は、試料を高温炉内ですっぽ中に溶融した後、るつぼを低温部へ徐々に移動（下降）させて、るつぼ先端部から単結晶を析出、育成する方法である。析出する固相の単結晶化を容易にするために、種結晶が用いられる。原理を 図 4.5 に示す。Mn-Zn フェライト単結晶の場合、1600～1700℃ で溶融されるが、高温において解離（特に ZnO の蒸発）を起こしやすいので、1～5 気圧の酸素中で育成される。かつて、磁気記録ヘッド用の Mn-Zn フェライト単結晶の殆んどはこの方法で大型のものがつくられ商品化されたが<sup>7)</sup>、現在では薄膜ヘッドなどにより置き換えられている。

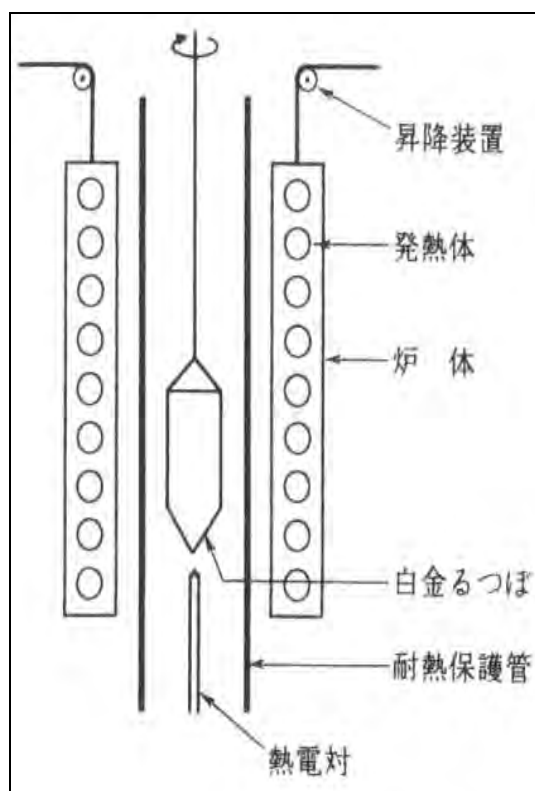


図 4.5 ブリッジマン法による単結晶育成装置<sup>6)</sup>

#### (b) 浮遊帯域溶融法<sup>8)</sup>

浮遊帯域溶融法（Floating Zone 法：FZ 法）は溶融帯を空間に浮遊させながら溶融、凝固により単結晶

を析出成長させる方法であり、るつぼを使用しないという大きな特徴がある。したがって、るつぼ材料からの汚染の心配がなく、高純度の単結晶を得るのに適している。溶融帯は融液の表面張力および固液界面張力によって浮遊させられるので融液の落下を防ぐために溶融帯の長さは限定される。加熱方式としては、抵抗加熱、高周波誘導加熱、赤外線集光加熱などがある。この方式では、定常的に原料が融液に供給されるので、Mn-Zn フェライトの場合でも組成の偏析が少ない。しかし、大型の単結晶を得ることが難しく、量産性に乏しいのが難点である。

#### 〈参考文献〉

- 1) 七條祐三、佐藤齊：“フェライト”日刊工業新聞社（1959）
- 2) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦：“フェライト”丸善（1986）
- 3) Y. Shichijo, G. Asano and E. Takama :J. Appl. Phys. Commun. Vol.35 P1646（1964）
- 4) 一ノ瀬昇、丹野善一：粉体粉末冶金講演概要集 P68（1970 春）P154（1971 春）
- 5) 滝川博：材料科学 Vol.21 P134（1984）
- 6) M. Sugimoto : J. Appl. Phys. Jpn., Vol.5 P557（1966）
- 7) 越前谷一彦、永田俊郎、福田泰隆、松下三芳：資源と素材 Vol.114 P353（1998）
- 8) S. Kimura, K. Kitamura and I. Shindo :J. Cryst. Growth, Vol.65 P543（1983）



# 5 | 各種フェライト材料

## 5.1 ソフトフェライト材料

酸化鉄  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  を主成分として含む軟質酸化物磁性材料、つまりソフトフェライトには、結晶構造から分類して次の3種類、すなわちスピネル型、ガーネット型およびフェロクスプレーナ型がある。いずれもその強磁性の発生機構は Néel の提唱したフェリ磁性<sup>1)</sup>で、磁気構造は二つの部分格子に分かれており、各部分格子の飽和磁化は超交換相互作用<sup>2)</sup>によって互いに反平行に整列しており、部分格子の飽和磁化の差が全体の飽和磁化  $I_s$  を与える。したがって、非磁性の Zn フェライトとの固溶体をつくると  $I_s$  がむしろ増大する。また、前述のようにフェライトは酸化物なので電気抵抗率は  $10^{-2} - 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  と高く、渦電流損失が少ないので高周波磁心として用いられている。

特に透磁率特性が広い周波数範囲にわたって得られるスピネル型フェライトが、各種の磁心材料として幅広く使用されている。ガーネット型フェライトは、マイクロ波帯での単結晶の損失が非常に小さいことから、この周波数帯での材料として注目されている。また主として薄膜単結晶の形であるが、バブル磁区の主材料として使用されている。フェロクスプレーナ型フェライトはスピネルやガーネットフェライトが立方晶の結晶構造であるのに対し、六方晶の構造をもち W 型を除いて c 面を磁化容易面とする材料である。立方晶のフェライトより高周波側での利用が可能なので VHF や UHF 帯のようなより高い周波数領域での材料が注目され、主としてマイクロ波帯を含む高周波帯域で使用されている<sup>3)</sup>。

ソフトフェライトは、一部は単結晶もしくは薄膜の形で磁心として使用されるが、多くの場合セラミックスの形で製造され使用する。つまり出発原料を混合し、仮焼、粉碎、造粒、成形、焼結、加工、検査の工程を経て製造される。出発原料は純度が 99.9% 以上の原料が使用され、特に高透磁率特性を得る目的では、不純物が 0.01% もしくはこれ以下の原料が使用される。また必要があれば 1 ~ 0.01% の範囲で添加物が加えられる。高透磁率特性を実現するためには緻密なセラミックスをつくることが必要で、焼結を加圧下で行うホットプレスや HIP ( Hot-Isostatic Pressing ) 焼結が行われる。フェライトは主成分の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の他に Mn, Ni, Co, Cu などを含むので、焼結時の雰囲気によって金属イオンの価数が増減し、緻密化を阻害し、さらには後述するように、フェライトの電気抵抗や透磁率特性に影響を与える。したがって、焼結時の雰囲気制御の技術が重要である。特に Mn-Zn 系フェライトでは Mn の価数が  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  など種々変化するので雰囲気制御は重要である。

表 5.1 は実用されている代表的なスピネル型フェライトの特性<sup>4)</sup>を示したもので、Mn-Zn フェライトは高透磁率、高飽和磁束密度であるが、抵抗率が小さいので数百 kHz までの周波数帯におけるテレビ用フライバックトランス、偏向コイル用磁心や通信機器用フィルタや、最近ではスイッチング電源用磁心などに使用される。Ni-Zn フェライト、Cu-Zn フェライトなどは、Mn-Zn フェライトの使用周波数よりも高い数十 MHz までの帯域で、ラジオ用のアンテナコイル、中間周波トランスなどに使用される。

表 5.1 主なスピネルフェライトの磁気特性<sup>4)</sup>

| 材 料               | 初透磁率    | 磁束密度(測定磁界 15 Oe) | 保磁力               | 損失(測定周波数)                         | $T_c [^{\circ}\text{C}]$ | $\rho [\Omega \cdot \text{cm}]$ |
|-------------------|---------|------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                   | $\mu_i$ | $B_m [\text{G}]$ | $H_c [\text{Oe}]$ | $(\tan \delta / \mu) \times 10^6$ |                          |                                 |
| Mn-Zn<br>フェライト    | 5 000   | 4 200            | 0.1               | 6.5 ( 10 kHz )                    | 130                      | 20                              |
|                   | 2 000   | 3 500            | 0.20              | 7 ( 100 kHz )                     | 150                      | 200                             |
|                   | 1 000   | 3 500            | 0.45              | 30 ( 100 kHz )                    | 200                      | 1 000                           |
| Cu-Zn<br>フェライト    | 500     | 2 000            | 0.5               | 100 ( 500 kHz )                   | 90                       | $10^6$                          |
|                   | 100     | 3 000            | 3.0               | 100 ( 2 MHz )                     | 350                      | $10^5$                          |
| Ni-Zn<br>フェライト    | 70      | 2 700            | 3.0               | 90 ( 10 MHz )                     | 350                      | $5 \times 10^4$                 |
|                   | 15      | 2 000            | 7.0               | 50 ( 20 MHz )                     | 450                      | $5 \times 10^4$                 |
| Cu-Zn-Mg<br>フェライト | 10      | 1 400            | 15                | 300 ( 20 MHz )                    | 500                      | $5 \times 10^4$                 |



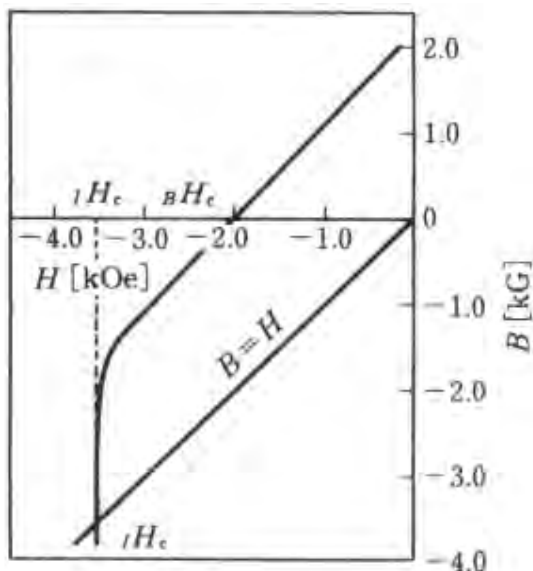
表 5.2 フェライト磁石の磁気特性<sup>5)</sup>

| 材 質 | 製 法                | $B_r$<br>[kG] | $H_c$<br>[kOe] | $iH_c$<br>[kOe] | $(BH)_{max}$<br>[MGoe] | $\Delta B_r/B_r \cdot \Delta T$<br>[%/°C] | $\Delta iH_c/iH_c \cdot \Delta T$<br>[%/°C] | 密 度<br>[g/cm <sup>3</sup> ] |
|-----|--------------------|---------------|----------------|-----------------|------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
| BaM | 等方性                | 2.2           | 1.8            | 3.2             | 1.0                    | -0.18                                     | +0.22                                       | 4.6                         |
|     |                    | 2.4           | 2.0            | 4.0             | 1.3                    | -0.19                                     |                                             | 5.0                         |
| BaM | 乾式異方性              | 3.6           | 1.8            | 1.9             | 3.0                    | -0.18                                     | +0.42                                       | 4.8                         |
|     |                    | 3.9           | 2.2            | 2.3             | 3.7                    | -0.19                                     |                                             | 5.1                         |
| BaM | 湿式異方性<br>(高エネルギー積) | 4.0           | 2.0            | 2.0             | 3.8                    | -0.18                                     | +0.48                                       | 5.0                         |
|     |                    | 4.3           | 2.4            | 2.4             | 4.2                    | -0.19                                     |                                             | 5.2                         |
| BaM | 湿式異方性<br>(高保磁力)    | 3.3           | 2.8            | 3.0             | 2.5                    | -0.18                                     | +0.35                                       | 4.5                         |
|     |                    | 3.7           | 3.2            | 3.5             | 3.0                    | -0.19                                     |                                             | 4.7                         |
| SrM | 湿式異方性<br>(高エネルギー積) | 4.1           | 2.4            | 2.5             | 4.0                    | -0.18                                     | +0.40                                       | 4.9                         |
|     |                    | 4.4           | 3.2            | 3.3             | 4.5                    | -0.19                                     |                                             | 5.0                         |
| SrM | 湿式異方性<br>(高保磁力)    | 3.6           | 3.3            | 4.0             | 3.1                    | -0.18                                     | +0.27                                       | 4.7                         |
|     |                    | 4.0           | 3.6            | 4.8             | 3.8                    | -0.19                                     |                                             | 4.9                         |

## 5.2 ハードフェライト材料

### (1) 等方性磁石<sup>5)</sup>

フェライト磁石には成形時に磁化容易軸を揃えた異方性磁石と無配向の等方性磁石との2種類がある。等方性磁石は成形時に粉体の結晶方位を揃える必要がないので、フェライト粉末にポリビニルアルコールなどのバインダーを添加して製造された顆粒を用いて粉末成形される。磁化容易軸はランダム分布となるので  $B_r$  は  $(1/2)M_s \times d_f/d_0$  で与えられ、実用材料で 2.0 ~ 2.3 kG である。ここで  $d_f$  は焼結体の見掛け密度、 $d_0$  は真の密度である。 $iH_c$  は 3 ~ 4 kOe の値をもつ、 $B_r < iH_c$  となるので、減磁曲線は直線になり、 $B = B_r - \mu_r \mu_0 H$  で表わされる。 $\mu_r$  はリコイル透磁率で 1.1 ~ 1.2 の値をもつ。図 5.1 にその減磁曲線を示す。

図 5.1 等方性 BaM の減磁曲線<sup>5)</sup>

減磁曲線の屈曲点は第 3 象限にあり、磁石どうしを反発させても減磁の心配はない。磁石特性を異方性磁石と一緒に表 5.2 に示した。特性的には異方性磁石と比べて劣るが、製造が容易で廉価であり、どの方向からでも着磁して使える長所をもつ。等方性磁石では  $B_r$  が  $M_s$  の 1/2 となる理論的性能限界から、BaM と SrM の特性差は縮小する。従来は原料価格を考慮して、Ba フェライトが生産されていたが、1966 年頃<sup>6)</sup>から Sr 系フェライト磁石が主流となっている。マイクロモータを中心に玩具用まで広範囲の用途に使われている。

### (2) 異方性磁石

成形時に磁界を所定方向に加えて、フェライト磁石粉の磁化容易軸を磁界方向に配向させて成形した後、焼結した高性能磁石である。成形時に高い配向率を得るため、フェライト粉末粒子は一軸の異方性をもつ均質な単結晶粒子が求められる。このため、最終焼結温度以上の高温で仮焼を行い、フェライト化反応を完結させると同時に結晶成長を促進させる。この仮焼品を微粉化するため、湿式粉碎を行って平均粒子径が 1  $\mu\text{m}$  以下の単結晶微粉をつくる。磁界中成形法には粉碎後乾燥された粉末を磁界中で成形する乾式磁場プレス法と湿式粉碎粉をスラリー状のまま金型に充填し、磁界中脱水、成形する湿式磁場プレス法がある。高性能磁石を製造するにあたって

- ①  $M_s$  の高い組成で、高い密度の焼結体をつくる
  - ② 配向度をより高くする
  - ③ 結晶粒径を単磁区限界粒子径に近づける
- という 3 条件を満足させることが重要な指導原理となる。①、③の条件は結晶成長を抑制しながら高密度

焼結体を得ることであり、通常の焼結機構では相反する現象である。このため、できるだけ細かな微粉を用い、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SrSO}_4$  など種々の添加物の存在下で、高密度化と結晶粒成長の抑制を同時に行う工夫がなされる。②の配向率の向上については磁界中成形時にいかに粒子の配向を 100% に近づけるかが重要な因子で、高性能磁石では通常湿式磁場プレスが採用される。高密度、高保磁力を得るために、成形されるフェライト磁石粉は細かい方が有利であることは確認されているが、同一配向率を得るための磁界強度は高くなり、配向率は一般に悪くなることと、成形能率が低下するという問題がある。湿式磁場プレスでは脱水しながらの成形であり、乾式成形に比べて成形速度は遅く、能率が劣るが高い配向率が得られる。材質的には BaM と SrM 系の 2 種が生産されている。SrM の  $M_s$  は BaM とほぼ同じであるが、異方性定数  $K_1$  が約 10% 高い（表 5.2 参照）。SrM は工業生産レベルでも BaM より高い保磁力が得られ、密度も 5% 小さい。したがって、高性能フェライト磁石は SrM の湿式磁場プレス製品となる。1967 年以降  $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{SrSO}_4$ 、 $\text{PbSO}_4$  など硫酸塩を添加した SrM が製品の主流となっている<sup>6)</sup>。

### 5.3 磁気記録材料<sup>5)</sup>

記憶・記録材料としての磁気テープ、磁気ディスクは、室温下で高密度、大容量の情報を容易かつ確実に記録できる。しかも情報保持性は長期間にわたり信頼性が高く、不揮発性、非破壊型でイレーザブル（繰り返し記録・再生・消去）記録が可能である。これらの特徴を生かし、音声映像のアナログ信号記録、コンピュータなどのデジタル信号の外部記憶またはファイル記録用媒体として民生用機器から産業用まで幅広く活用されている。

磁気テープの発展が優れた磁性粉の開発に裏付けられていることは明白である。磁性粉に求められる項目は磁気特性の他に、物理的機械的特性も重要となる。

すなわち、1) 針状性に優れ、微粒子で粒子サイズ分布が一様であること、2) システムに適合する保磁力、磁束密度を有すること（現在では 300 ~ 1000 Oe, 70 ~ 140 emu/g 程度）、3) 磁気的・化学的に安定であること、4) 分散、配向性のよいこと、5) 安価であること、などである。表 5.3 に各種磁性粉の特性を示し、これらの中で磁性粉として代表的な  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  と Co 系酸化鉄について簡単に説明を加える。

(1)  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  最も基本的な材料で 表 5.3 に示すとおりフェリ磁性でスピネル形立方晶系のため直接針状結晶は合成できず、ゲータイト ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) の針状微結晶の形態を保持しながら 図 5.2 の工程を経て合成する。したがって、酸化鉄系材料は最終目標の媒体特性を満足させるために最も有利な特性のゲータイトをいかに得るかが決め手となる。図 5.3 にゲータイトの基本的な製法を、図 5.4 に  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  を構成する結晶子のサイズと磁気特性の関係を示す。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  は化学的磁気的に不安定である。

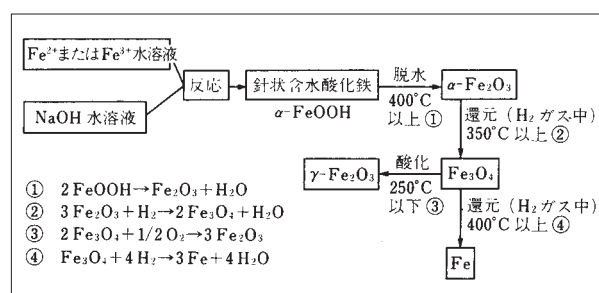


図 5.2 Fe 系磁性粒子の代表的な作成方法<sup>4)</sup>

表 5.3 各種磁性粉の諸特性<sup>4)</sup>

|                                           | $H_c$<br>[Oe] | $\sigma_s$<br>[emu/g] | 粒子サイズ<br>[ $\mu\text{m}$ ] | 結晶構造  | $K_1$<br>[erg/cc]    | 形状 |
|-------------------------------------------|---------------|-----------------------|----------------------------|-------|----------------------|----|
| $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$            | 200~450       | 70~75                 | 0.1~0.5 $\times$ 0.01~0.05 | 逆スピネル | $-4.64 \times 10^4$  | 針状 |
| $\text{Fe}_3\text{O}_4$                   | 200~450       | 75~80                 | "                          | "     | $-1.10 \times 10^5$  | "  |
| Co 吸着形酸化鉄                                 | 500~800       | 70~75                 | "                          | "     |                      | "  |
| Co 固溶形酸化鉄                                 | 500~2 500     | 70~75                 | "                          | "     | $\sim 1 \times 10^6$ | "  |
| $\text{CrO}_2$                            | 500~700       | 70~90                 | "                          | ルチル   | $2.50 \times 10^5$   | "  |
| Fe                                        | 1 000~2 300   | 100~150               | "                          | 体心立方  |                      | "  |
| $\text{Fe}_4\text{N}$                     | 600~800       | 120~140               | "                          | 面心立方  |                      | "  |
| $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 600~1 500     | ~58                   | 0.08 $\times$ 0.03         | 六方晶   | $3.30 \times 10^5$   | 板状 |

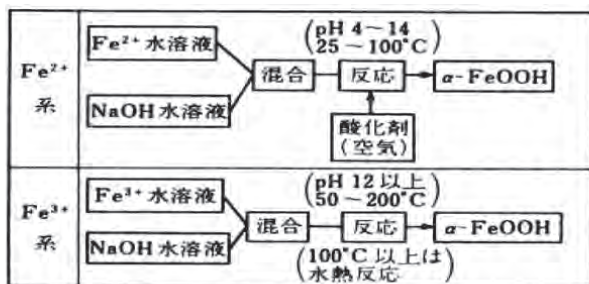


図 5.3 ゲータイトの基本的な製法<sup>4)</sup>

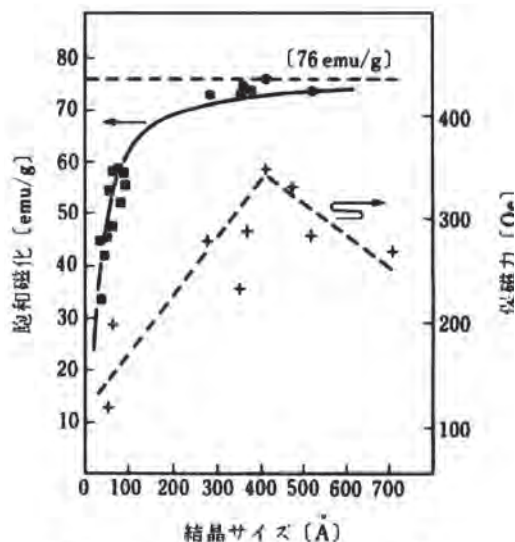


図 5.4  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶子と磁気特性<sup>4)</sup>

(2) Co 系酸化鉄 コバルトフェライト (CoO - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) は Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> あるいは

$\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と同じスピネル形結晶構造であり固溶し合うこともできる。コバルトフェライトの磁気歪定数は  $10^{-4}$ 、また、結晶磁気異方性  $K_1$  は  $10^6 \text{ erg/cm}^2$  であり  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 他のフェライトに比べ 1 桁以上大きい。この結晶磁気異方性が大きいことを利用して  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に適当量の Co<sup>2+</sup> を固溶させ高保磁力磁性粉をつくるのが検討されたが、保磁力の経時変化、加熱減磁や加圧減磁の増大に起因する記録信号の再生減磁が問題であった。これらの点を改善する方法として“コバルト被着型”酸化鉄磁性粉が生まれた。これは  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粒子表面数 10Å 以内のごく薄い層に Co<sup>2+</sup> を拡散させた構造を有している。表面の薄いコバルト吸着層から発生する表面磁気異方性 ( $K_s$ ) は、 $10^6 \text{ erg/cm}^2$  の桁でこれにより保磁力は向上し、一応 Co<sup>2+</sup> 固溶による問題点は改善された。コバルト吸着型酸化鉄粒子表面を酸で少しずつ溶出させて、コバルト吸着層を取り除いていったときの保磁力の変化が調べられ、吸着前の粒子の保磁力は約 430 Oe であり、コバルト吸着量 2.25 % 以上では粒子の保磁力は一定値 (525 Oe) となっている。この結果は粒子の表面の磁気異方性の存在を示唆している。

$\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系テープは長い間 HiFi 用途のオーディオ、ビデオテープにまた高密度フレキシブルディスクにアビリンなどの商品名<sup>7)</sup>で広く活用されてきたが、最近コンパクトディスク (CD) が主流となりつつある。

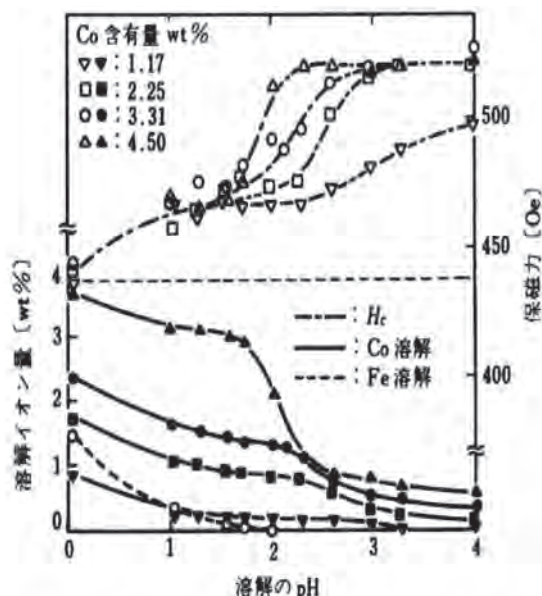


図 5.5 粒子表面層を溶解したときの溶解イオン量 (粒子に対する wt %) と保磁力の変化<sup>4)</sup>

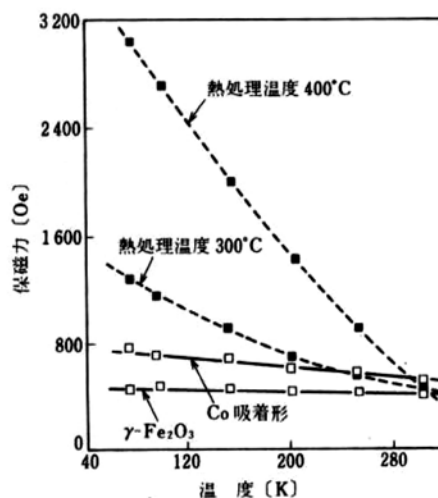


図 5.6 保磁力の温度依存性<sup>4)</sup>

## 5.4 磁気バブル材料

磁気メモリ素子として応用が考えられてから、永年にわたる研究開発が続けられてきた。開発当初は、高密度、不揮発性、低消費電力を特徴とし、機械的駆動をもたない固体記憶素子として磁気ドラム、磁気ディスクに置き換わり、さらにはロジックへの応用可能でバブルコンピュータへの発展までもが期待された<sup>8)</sup>。

しかしその後 IC メモリ、マイクロプロセッサ、磁気ディスク、フロッピーディスクなどの目ざましい進歩のため、応用の範囲は特定分野市場でのメモリ素子



としての利用に限定されている。磁気バブルは、厚さ数  $\mu\text{m}$  の垂直磁化膜に生成する直径  $1 \sim 3 \mu\text{m}$  の円柱状反転磁区を称し、情報担体として用いる。したがって、異方性磁界 ( $H_r$ ) と飽和磁化 ( $M_s$ ) との間には  $H_k > 4 \pi M_s$  の条件が必要となる。このとき、面に垂直なバイアス磁界を加えるとバブル磁区が生成する。バブルの有無が2値変数に対応し、汎用素子の記憶度は約  $4 \times 10^6 \text{bit/cm}^2$  である。薄膜表面に微細なパターンをパーマロイ膜やイオン注入で設け、バブル位置を決め、回転磁界でバブルを転送しシフトレジスタとする。さらにバブル発生部、消去部および磁気抵抗効果などを用いたバブルの有無の検出部などで大容量メモリが構成される。

デバイス側から見ると、基本的要求特性としてはバブル径、バブル移動速度、温度特性、マージンの広さなどで、これらを材料特性にそれぞれ換言すると飽和磁化 ( $4 \pi M_s$ )、異方性エネルギー ( $K_u$ )、磁極の移動度  $\mu_w$ 、材料の温度特性に関係する。材料としては表 5.4 に示すオルソフェライト、ガーネット、アモルファス合金などがある。しかし、今日実用化が図られているのはガーネットである。ガーネット型バブルが有利な点は、1) 径が小さく高ビット密度化ができる、2) 移動速度が大きく転送レートを高める、3) 駆動力が小さく消費電力を低下させる、4) 温度特性がよく高信頼性となる、5) エピタキシャル膜がつくりやすい、などである。低コスト化の面から言えばアモルファス

膜は、スパッタ手法でガラス、プラスチックなどの安価な基板に成膜できる点で有利であるが、温度特性上ガーネットに劣るためバブル材料よりは光磁気材料としての応用が検討されている。

#### 〈参考文献〉

- 1) L. Néel: Ann. Phys. (Paris) Vol. 3 P137 (1948)
- 2) P. W. Anderson: Phys. Rev. Vol. 79 P350 (1950)
- 3) 平塚信之: 電磁環境工学情報 Vol. 20 P68 (2007)
- 4) 桜井良文、金丸文一 共編: “磁性材料セラミックス” (1986)
- 5) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦: “フェライト” 丸善 (1986)
- 6) A. Cochardt: J. Appl. Phys. Vol. 38 P1904 (1967)
- 7) Y. Imaoka, T. Tada, T. Ishikawa and T. Uehori: US Patent No. 3,770,500 (1973)
- 8) A. H. Bobeck, E. G. Spencer, L. G. Van Uitert, S. C. Abrahams, R. L. Barns, W. H. Grodkiewicz, R. C. Shewood, R. H. Schmidt and E. M. Walters: Appl. Phys. Lett. Vol. 17 P 131 (1970)

表 5.4 バブル材料とその特性<sup>4)</sup>

| 材 料                        | 特 性 | バブルの直径<br>[ $\mu\text{m}$ ] | バブルの移動速度<br>[cm/s/Oe] | 温 度 特 性     |
|----------------------------|-----|-----------------------------|-----------------------|-------------|
| オルソフェライト <sup>*1</sup>     |     | 15~150                      | ~7 000                | ×           |
| ガーネット <sup>*2</sup>        |     | 0.3~15                      | ~4 500                | ○           |
| アモルファス Gd-Co <sup>*3</sup> |     | 3>                          | ~2 000                | 380℃くらいで結晶化 |

[注] \*1 化学式:  $R\text{FeO}_3$  (R: 希土類元素, Y など)、フラックス法やゾーンメルティング法でつくる。

\*2 化学式:  $A_3B_5O_{12}$  (A: 希土類元素, Y など. B: Fe, Ga, Al, Ge など) 通常, 非磁性のガーネット ( $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ) の単結晶の上に, 液相エピタキシャル法で単結晶薄膜として成長させてウェーハをつくる。

\*3 ガラスなどの基板上にスパッタリング法や蒸着法で薄膜をつける。



# 6 フェライトの応用

## 6.1 コア応用<sup>1)</sup>

ソフトフェライトの代表的な特性として、初透磁率 ( $\mu_i$ )、相対損失係数 ( $\tan \delta / \mu_i$ )、飽和磁束密度 (BS)、キュリー温度 ( $T_c$ ) などがあげられる。一般的には、 $\mu_i$ 、BS、 $T_c$  は高いほど、 $\tan \delta / \mu_i$  は低いほど望ましいとされる。しかし、これらの要求すべてを同時に満足させることはできないので、実用材料においては、どの特性を重視するかによって材質の選択が異なってくる。ソフトフェライトには図 6.1 に示すように周波数特性があるので、各周波数帯域で最適な組成系が異なる。表 6.1 はソフトフェライトのコア応用、材質、形状ならびに要求特性をまとめたものである。

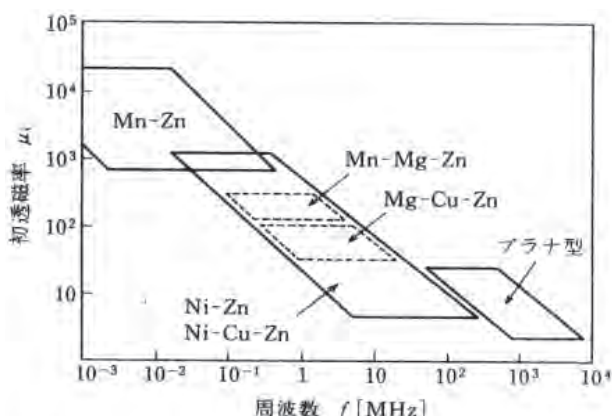


図 6.1 主なソフトフェライトの初透磁率と使用周波数帯<sup>1)</sup>

表 6.1 ソフトフェライトコアの主な用途と特性<sup>1)</sup>

| 用途       | 特性                | 使用周波数         | フェライトの種類 | 形状    | 要求される特性            |
|----------|-------------------|---------------|----------|-------|--------------------|
| コイル・トランス | 通信用コイル            | 1kHz ~ 1MHz   | Mn-Zn    | つぼ型   | 低損失、安定度、温度係数、L可変   |
|          | 各種小型コイル (TV、ラジオ用) | 0.5 ~ 80MHz   | Ni-Zn    | ドラム型  | 低損失、安定度、温度係数       |
|          | アンテナコイル           | 0.1 ~ 300MHz  | Ni-Cu-Zn | ネジ型   | 透磁率、低損失、安定度        |
|          | 通信用トランス           | 0.4 ~ 20MHz   | Ni-Zn    | 丸棒状   | 高透磁率、高飽和磁束密度、低歪率   |
|          | 中間周波トランス          | ~ 1.0MHz      | Mg-Cu-Zn | 平板状   | 高透磁率、高飽和磁束密度、低歪率   |
| 電源       | ロータリートランス         | 0.4 ~ 60MHz   | Ni-Zn    | つぼ型   | 低損失、安定度、温度係数、L可変   |
|          | ロータリートランス         | 0.4 ~ 60MHz   | Ni-Cu-Zn | ドラム型  | 低損失、安定度、温度係数、L可変   |
|          | パルス用トランス          | 1 ~ 100kHz    | MN-Zn    | ディスク型 | 高透磁率、低損失、安定度       |
|          | パルス用トランス          | 1 ~ 100kHz    | MN-Zn    | リング型  | 高透磁率 (パルス)         |
| 偏向       | フライバックトランス        | 15.75 ~ 65kHz | MN-Zn    | E 型   | 低電力損失、高透磁率、高飽和磁束密度 |
|          | スイッチングトランス        | 25 ~ 500kHz   | Mn-Zn    | E 型   | 高飽和磁束密度            |
| 偏向       | 偏向ヨーク (CRT用)      | 15.75 ~ 65kHz | Mn-Mg    | つぼ型   | 寸法精度、低電力損失 (Mn-Zn) |
|          | 偏向ヨーク (CRT用)      | 15.75 ~ 65kHz | Mn-Zn    | 朝顔型   | 寸法精度、低電力損失 (Mn-Zn) |

トランスやコイルは電子回路に使われる磁性部品の代表的なものである。そして、これに用いるフェライトコアには、入力電気信号を効率よく、しかも忠実に

伝えるために必要な弱電界中での優れた高周波磁気特性が求められる。これらの要求特性を要約すれば次のようになる。

- ① 使用周波数、温度範囲で高い初透磁率をもつ。
- ② 磁気損失が小さい。
- ③ 指定された温度係数 (ゼロまたは指定値) をもつ。
- ④ 信号の高調波歪 (フェライトから出る) が小さい。
- ⑤ ディスアコモデーション (DA)、その他が小さく、磁気安定性がよい。

また、トランスとコイルとでは要求特性の優先度に少し差があり、一般にトランスでは、まず高い初透磁率が重視され、コイルでは低い磁気損失と温度係数を含む磁気安定性が重視される。

### (a) 通信用コア

通信用のコイルには、コンデンサと組み合わせて同調回路を構成し、その周波数選択特性により、周波数分割多重搬送通信に用いられるフィルタ用コイルや、チョークコイル、発振コイル、ローディングコイルなどがある。コア材料は多くの場合 Mn-Zn 系フェライトが使われるが、一部高周波用に Ni-Zn 系フェライトも用いられる。また、コア形状は、主につぼ型コアが用いられる。通常、コイル損失の低減やインダクタンスの可変、磁気安定性や非線形歪の改善などを実現するために、空隙を設けて使用する。

通信用トランスとしては、搬送装置のインピーダンス変換、位相反転、平衡・不平衡変換、信号の分岐・結合などの用途に透磁率の高い Mn-Zn 系フェライトの E 型コアやつぼ型コアなどが用いられる。電子計算機の信号や、PCM 方式通信の信号などではパルス波形であることから、これらの用途に用いられるトランスをパルストランスと言う。パルスという不連続波が伝送されるので高透磁率であることと巻線の分布容量および漏洩磁束密度の小さいことが要求され、トロイダル形状の Mn-Zn 系フェライトが多く用いられる。

### (b) テレビ、ラジオ用コア

この分野のコイル・トランスは、周波数が高いことから、一部の用途を除いて大きなインダクタンスをもつことよりも、磁気特性の安定性が要求され、また他の回路部品とのバランスが重視される。形状も空隙をもつものが多く、棒状コアのように完全な開磁路の場合もある。

コイルとしては、局部発信用コイル、フィルタ用コ

イル、ピーキングコイル、チョークコイルなどの多種の小型インダクタがあり、さらに同調コイルとしては、中・短波ラジオ用バーアンテナのアンテナコアやカーラジオの $\mu$ 同調型コイルがある。

トランスとしては、ネジコアを使ってインダクタンス調整可能な構造とした中間周波トランスが代表的な例であるが、その他に、バルントランス、糸巻歪補正用トランス、VTR用ロータリートランスなどがある（この他、フライバックトランスがあるが、後で述べるパワーフェライトに属する）。

これらのコイル・トランスに用いられる磁心にはネジコア、カップ型コア、ドラム型コア、棒状コアなどの多くの形状があり、組成もNi-Zn系、Ni-Cu-Zn系、Mg-Cu-Zn系などがある。形状や材質は、用途に応じて選択され、あるいは新規に設計・開発される。

## 6.2 メモリ応用<sup>2)</sup>

計算機にはアナログ型とデジタル型の二種ある。前者は計算を等価電気回路に置き換えて行うものであるが、後者は数字そのものを取扱う。矩形のヒステリシスをもつフェライトはデジタル型に有用になるのである。すなわち 図 6.2 (a) にみるような角形の BH 曲線を有するとすると 2 進数の記憶ができる。磁性の消えた状態に  $+H_m$  の磁場をかけると、 $B_r$  という残留磁気が生ずる。磁心はこの状態（“1”）に永く留まることができる。これに  $-H_m$  をかけると明らかに“0”の状態の（ $-B_r$ ）にうつることになることも理解される。このさい磁束密度は  $B_m$  だけ大きく変わるので、後述の出力巻線からパルスが発生するから、これを計算量として利用する。磁心が最初  $+B_m$ （“1”）のところにあったとすると  $+H_m$  をかけても  $\Delta B_m$  しか磁束が変わらないため、わずかの電圧しか発生しない。そこで磁心のヒステリシス曲線の表わし方を  $B_r/B_m$  で表わして角型比（squareness ratio）と称することがある。これができるだけ 1 に近いことが、この種のものでは重要である。また磁心の巻線と生ずる電圧の比は  $B_r/\Delta B_m$  に比例するからこれを用いる場合もある。

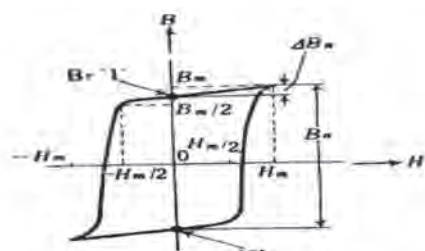
素子は一致回路に構成されるから縦線横線から  $H_m/2$  に相当するパルスを同時に送れば前述により出力巻線に重圧が発生する。このようなコアを実際に試験するには図 6.2 (a) のような BH 曲線をブラウン管上に映し出してもだいたいわかるが、通常はパルス試験を行う。図 6.2 (b) の上段のようなパルスをかけると中段のような電圧  $e$  が起こる。最下段は磁束であ

る。e を積分すれば磁束になることから  $B_r/B_m$  の関係を求めることもできるが、パルスの尾を引くことが計算速度に重要な関係をもつことに注意を要する。

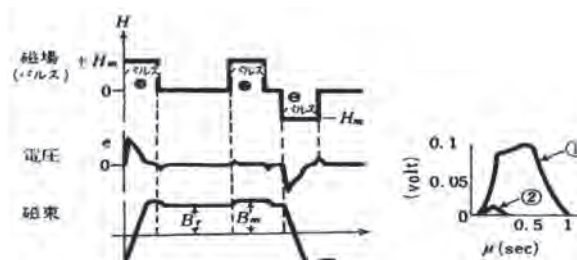
この種の磁心として重要な性質は次のようなものであって、時定数と磁場には通常次の関係が成り立つ。

$$Sw = \tau_s (H - H_0)$$

$\tau_s$  はこの磁心の時定数、 $(H - H_0)$  は有効磁場である。つまり速い磁気現象をうるためには強い磁場をかければよいということになる。通常  $\tau_s$  をマイクロ秒、 $H, H_0$  を oersted で表わす。



(a) 角型ヒステリシス



(b)



(c)

図 6.2 角型フェライトのパルス特性<sup>2)</sup>

図 6.2 (c) は前述の磁心において  $H_m$  にあたる磁場（書入、読出パルス）の間に  $1/2H_m$  にあたるパルスを入挿して雑音的操作を加えた連続磁心選別装置の画いた図で、多数のものを自動的に選別できる機械ができています。

フェライトメモリはパラメトロン電子計算機用<sup>3)</sup>などとして 1960 年頃から実用化され一時は隆盛を極めたが、半導体メモリの登場により 1985 年頃には姿を消していった。

## 6.3 マイクロ波応用<sup>4)</sup>

フェライトのマイクロ波用途への応用は1950年代にアメリカで始まった。当初は主にスピネル型フェライトが使われたが、1956年フランスで希土類ガーネット型フェライトが発見され<sup>5)</sup>、磁気損失が飛躍的に改善されることが確認されると、その後はガーネット型フェライトが一般的に使用されるようになった。一方、移動体通信は1979年に日本電信電話公社（当時、現NTT）が日本における運用を開始した自動車電話に始まり、その後持ち運びが可能なショルダーホンを経て、1987年にハンディタイプの携帯電話が登場し急速に普及が進んだ。

携帯電話では、人体などの影響でアンテナのインピーダンスが変動すると、出力信号の一部がアンテナで反射してパワーアンプに戻るため、パワーアンプの電力効率が低下したり、隣接チャンネル妨害波などの不要な信号が発生したりする弊害が起こる。アイソレータは順方向の信号は通過させるが、逆方向の信号は遮断する機能を有しているため、アンテナのインピーダンス変動に対して実効的な負荷変動を小さくすることができる。アイソレータは主に携帯電話内部のRF部に使われる。一般的なRF部の回路ブロック図を図6.3に示す。

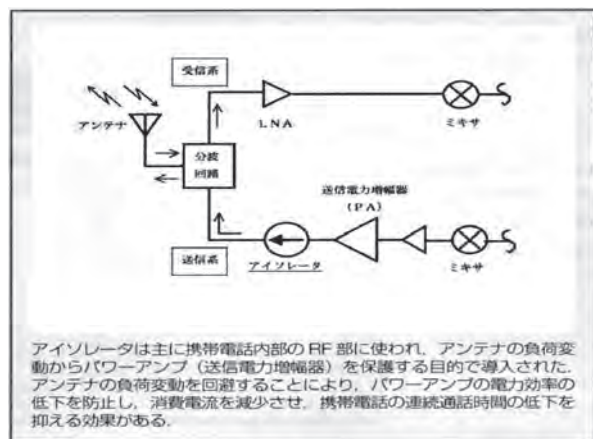


図6.3 携帯電話のRF部のブロック回路図<sup>4)</sup>

アイソレータの基本動作は図6.4(a)に示す3ポートサーキュレータで説明される。

図6.4(b)はサーキュレータの一つのポートに終端抵抗を接続したものであり、アイソレータとして動作し、負荷側からの反射波を送信側であるポート①へは伝送させない機能をもつ。

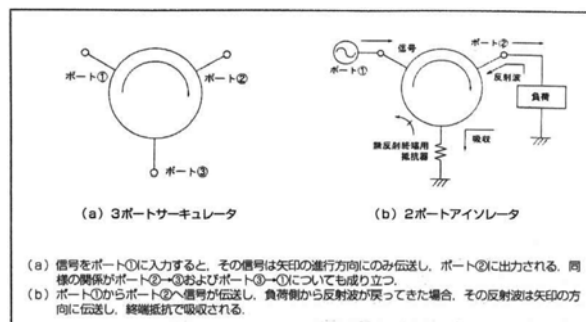


図6.4 アイソレータの基本動作<sup>4)</sup>

当初は、導波管タイプや接合タイプの分布定数型アイソレータは必要とするフェライトの大きさが周波数に反比例するため携帯電話の通信周波数帯である800MHz～2GHz付近では直径数cmのフェライトが必要となり素子の小型化が困難であった。そこで、携帯電話の送信回路用としては、小型化が可能な集中定数型アイソレータが採用された。集中定数型アイソレータの基本構成を図6.5に示す。直流磁界が印加されたフェライト上に互いに120°の角度をなした中心電極が電気的に絶縁されて重ね合わさった構造となっている。

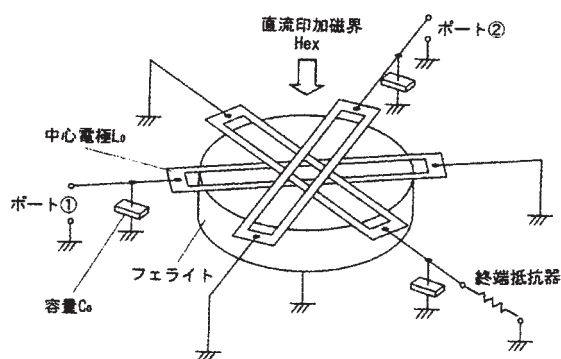


図6.5 集中定数型アイソレータの基本構成<sup>4)</sup>

アイソレータ用マイクロ波フェライトに要求される性能としては、

- 1) 磁氣的損失が小さいこと。すなわち材料定数 $\angle H$ （強磁性共鳴半値幅）が小さいこと。
- 2) 飽和磁化の温度係数がバイアス用磁石の温度係数に近いこと。

などがあげられる。1)は1W程度の比較的高電力の高周波信号を通過させるので挿入損失を小さくしてフェライトの発熱量を小さくする必要があるからである。2)の理由は以下のとおりである。外部磁界が印加されたフェライトに外部磁界と直交する高周波磁界を印加した場合、フェライトの円偏波透磁率 $\mu \pm$ はフェライトの飽和磁化( $M_s$ )と内部直流磁界( $H_{in}$ )



に影響される。そこで、磁石の残留磁束密度の温度係数とマイクロ波フェライトの温度係数を揃えることにより相対的の温度変化に対して電気特性を安定化させる必要がある。

以上の理由によりアイソレータ用マイクロ波フェライトには一般的にはYIG（イットリウム・アイアン・ガーネット）が用いられる。YIGは $\Delta H$ が小さく、かつ、組成比を選ぶことにより飽和磁化の温度係数を制御できるからである。

携帯電話は、伝送速度の高速化と機能の増加により、部品点数や消費電流が増加する傾向にある。また、使用する周波数帯を従来の2バンドから3バンドに変更することも検討されており、部品点数がますます増加する傾向にあるこのような状況から携帯電話のRF部に使用されるアイソレータは小型低背、軽量化、消費電流低減に貢献できる高性能の要求がますます強くなると予想される。今後、基本構造の見直し、フェライト部の高精度電極形成技術やセラミック多層基板の特徴を生かした構造設計などにより、アイソレータのさらなる小型低背・高性能が期待される。<sup>6)</sup>

## 6.4 大電力応用<sup>7)</sup>

商用周波数（50 また 60 Hz）で使われる一般電源用磁心には、従来からケイ素鋼板が用いられており、フェライトが用いられることはなかった。飽和磁束密度が低いという弱点があったからである。しかし近年、エレクトロニクス機器の普及に伴って、電源の小型化への要請が強まり、電力変換部の周波数を高周波に上げて処理する、いわゆる高周波電源方式が急速に発展してきた。フェライトはこのような技術的背景のもとで見直されるようになり、今や電源分野においても不可欠な材料となっている。

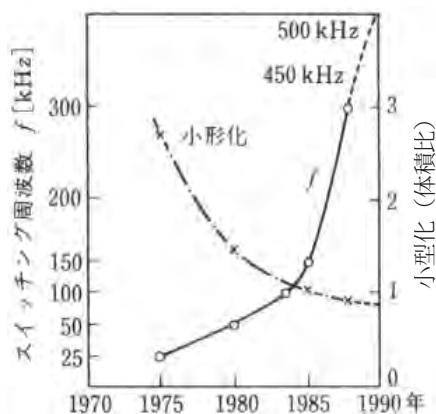


図6.6 スイッチング電源の高周波化の過程<sup>1)</sup>

一般に、電源装置を小型軽量にするためには、処理周波数を上げた方が有利である。しかし実際にはいろいろな制約があるので、現在は500 kHz程度までの高周波化が実現するものと考えられている。図6.6は高周波電源の中で最も一般的なスイッチングレギュレータ（フォワードコンバータ方式）を例にとり、高周波化および小型化の推移を示したものである。このような高周波化が実現できた最大の理由は、高周波電力損失の少ないフェライトが開発されたことにあるが、これには、前述の弱磁界における磁気損失の問題とは若干異なる事情があることを次に述べる。

ここで用いられるフェライトは比較的強い磁界中で動作するので、一般の用途に比べて磁気損失が著しく増大するところに最大の問題がある。このためにこれを高周波電力損失あるいはパワーロスと呼び、またこれを低減するために開発された一群のフェライトをパワーフェライト（大電力フェライト）と呼ぶことがある。ここではまず、高周波電源用磁心としてのフェライトの特徴を要約する。次いで要求特性の主なものについて述べる。

一般にトランスを正弦波で駆動すると、磁束密度Bは次のように表わされる。

$$B = (E_p / 4.44 N_p A \text{ 匝}) \times 10^7 [\text{mT}]$$

ここに $E_p$ は1次側印加電圧[V]、 $N_p$ は一次側巻線数、 $A$ は磁心断面積[cm<sup>2</sup>]、匝は周波数[Hz]である。したがって匝を高くすればBは小さくてすむことになり、フェライトのBが低いという弱点はこのことによって一部補われることになる。またトランスの設計上許される範囲のBに対しては、 $N_p A$ の値を小さくすることもできるので、トランスの小形化の可能性が出てくる。フェライトが高周波電源用磁心として見直されてきた理由もここにある。

高周波大電力用フェライトの最大の用途は現在のところプロトンシンクロトロンである。プロトンシンクロトロンはよく知られるように代表的な巨大加速器であり、陽子を長大な真空の環状パイプ（直径1 kmに及ぶ）内で周回させて、最終的にほぼ光速に等しい高エネルギーとする装置である。陽子を加速するには陽子の速度に見合った周波数をもつ（陽子がパイプを周回して再びその位置に来たときにつねに加速側位相であるように）高周波の高電圧が用いられるが、陽子が速度を増すとそれにしたがって周波数を上げていかなければならない。そのためにL素子としてフェライトを使ったLC共振器をつくりこれに高圧発生を受持たせて、そのLを直流バイアスで減少させて共振周波数を上げるという方法が一般に用いられてい



る。ここではフェライトは高い加速電圧を得る必要と装置のコストパフォーマンスを極限まで追求する結果かなり厳しい使用条件が課せられる。

高周波加速器の構造を 図 6.7 に示した。フェライトは大形のリング状（外径 20 ～ 50cm、内径 10 ～ 30cm、厚さ 2.5cm 程度）のものを数十枚重ねて用いる。1 基のプロトンシンクロトロンには数十台パイプに沿って配置されている。フェライトの特性に対する要求は、まず高い  $B_{r\text{ 飽 }}$  における損失が小さいこと、次いで同一バイアス電流に対する  $\mu$  変化率（バイアス感度）が高いことである。ただし後者は  $\mu$  値そのものに大きく依存するから材質設計上の自由度はそう大きくはない。損失は高周波加速器の出力電圧を同一とした場合フェライトの  $\mu$ 、 $Q$ 、 $\text{厚}$  の積に反比例するから普通  $\mu Q \text{ 厚}$  をこの目的のフェライトの figure of merit に用いる。従来のフェライトでは  $B_{r\text{ 飽 }}$  20G 程度で  $\mu Q \text{ 厚}$  は約  $1 \times 10^{10}$  に過ぎなかったが、鉄不足型 Ni-Zn-Co 系フェライトが実用化されるようになって  $B_{r\text{ 飽 }}$  100G 程度でも  $3 \sim 10 \times 10^{10}$  の値が得られるようになった<sup>8)</sup>。

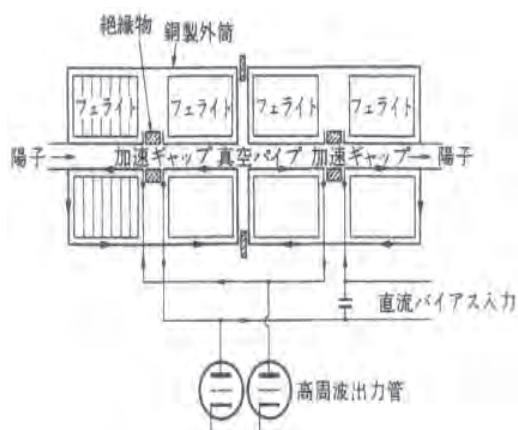


図 6.7 プロトンシンクロトンの高周波加速器<sup>8)</sup>

## 6.5 磁歪応用<sup>9)</sup>

磁歪（磁気歪）現象とは強磁性体を磁化したときに磁性体の外形が変形することを言う。この現象は工業的には電気音響変換素子、すなわち磁気歪振動子として、超音波の発生に古くから利用されている。いくつかの装置の例をあげると、ソナー（音響測深器、魚群探知機を含む）、超音波洗浄・乳化・分散・殺菌・機械加工機などである。ここで言うソナー(Sonar)とは、Sound Navigation and Ranging の略で、水中パルスの反響を利用した探知や測距、測角を行なう装置である。

磁気歪の逆効果として、強磁性体を歪めると主に磁気異方性が変化し、これに伴って透磁率などが変わる。このことを利用して歪や応力のセンサにも用いられる。

磁気歪振動子の構造は、大きく分けて 図 6.8 に示す角型と環状の 2 種類となり、それぞれの機械的共振周波数は次のようになる。

$$f = (E/\rho)^{1/2} / 2l \quad (\text{角型}), \quad f = (E/\rho)^{1/2} / 2\pi R \quad (\text{環状})$$

ここに、 $E$  は Young 率、 $\rho$  は密度、 $l$  は角形振動子の振動方向の長さ、 $R$  は環状振動子の平均半径である。外部から電氣的に励振する場合、この共振周波数と一致させないと、十分大きな振動を得ることはできない。そこで、発振できる超音波の振動数は試料寸法で定められることとなり、あまり高い周波数も低い周波数も発振はできず、数 kHz から 100kHz に制限される。磁気歪の大きさは磁化の向きを逆にしても変わらないので、消磁状態で微小振幅の励振をしても磁気歪振動は発生しない。そこで、図 6.8 のような構造の場合には、巻線に直流の電流を重ねる必要があるし、別に永久磁石を挿入して磁氣的にバイアスを与える方法もある。

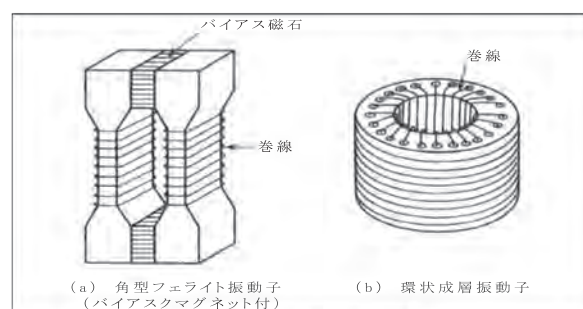


図 6.8 磁気歪振動子の構造<sup>9)</sup>

磁気歪振動子材料の最も大切な特性は、磁氣的に加えられたエネルギーがどれだけ弾性エネルギーに変換されるかにあり、この割合を通常  $k^2$  として、 $k$  を電気機械結合係数あるいは磁気弾性結合係数と呼んでいる。 $k$  は一般に % で示される。歪センサとしての逆の応用の場合にも、やはりこの電気機械結合係数が最も大切な材料特性となる。すなわち、 $k$  の値は磁気歪振動子の能率や感度に関係のある最も重要な量である。 $k^2$  はバイアス点近傍における歪の変化率に比例するのは当然として、その点での可逆透磁率にも比例するので、いくら磁気歪定数の大きい材料でも磁氣的にソフトでないと使用できない。換言すれば、結晶磁気異方性が 0 で、磁気歪定数の大きい材料でなければならない。この意味では、もともと結晶磁気異方性の存在

しないアモルファス材料は大変に有望である。振動子材料では、振動による応力が非常に大きくなって破壊に至ることもあり、機械的強度が大きいことも欠くことのできない重要な特性となる。

従来、磁気歪材料としては Ni や AlFe 合金が使用されていたが、これらは高価な上に絶縁薄層に成形しなければならないので製造が困難といった難点があった。これに対してフェライトでは、Ni フェライトおよびこれを主体とする混合フェライトが、大きな電気機械結合係数を示す。Cu フェライトを加えるのは、Ni フェライトの焼結温度を下げるためのものであり、これに Co フェライトをわずかに加えると結晶磁気異方性が 0 となって、電気機械結合係数を極大にすることができる。

表 6.2 は、これらの主な磁気歪材料の諸特性をまとめて示したものである。

表 6.2 主な磁気歪材料とその特性<sup>9)</sup>

| 名 称   | 組 成                      | 電気機械結合係数          | 磁気歪率                 | Curie 温度   | 電気抵抗率              | 密度                               | 縦磁率                   |
|-------|--------------------------|-------------------|----------------------|------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------|
|       | [%]                      |                   |                      | [°C]       | [Ω/cm]             | [g/cm <sup>3</sup> ]             | [cm/s]                |
| 金     | Ni                       | 0.20~0.31         | -35×10 <sup>-4</sup> | 358        | 7×10 <sup>-4</sup> | 8.9                              | 4.75×10 <sup>-3</sup> |
|       | Ni-Co 合金                 | 4.5 Co<br>18.5 Co | -0.51<br>-0.41       | -33<br>-23 | 410<br>570         | 10.5<br>11                       |                       |
|       | Ni-Co-Cr 合金              | 1.4 Co, 2.3 Cr    | -0.37                | 240        | 30                 |                                  |                       |
|       | Ni-Fe 合金<br>45 Permalloy | 45 Ni             | 0.18~0.35            | 27         | 444                | 45                               | 8.2<br>4.1            |
| 鋼     | Fe-Co 合金<br>2V Permalloy | 49 Co, 2 V        | 0.26~0.37            | 70         | 980                | 26                               | 8.2<br>5.2            |
|       | Fe-Al 合金                 | 12 Al             | 0.22~0.33            | 40         | ~500               | 90                               | 6.6<br>4.5            |
| フェライト | フェロクサニウム 4E              | 1.0, 0            | 0.18~0.21            | -27        | 590                | 10 <sup>3</sup> 以上               | 5.0~5.1<br>5.8        |
|       | フェロクサニウム 7B              | 1.0, 0.012        | 0.19~0.24            | -27        | 590                | 10 <sup>3</sup> 以上               | 5.1~5.2<br>5.7        |
|       | フェロクサニウム 7AI             | 0.8, 0.022        | 0.25~0.32            | -28        | 530                | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> | 5.1~5.2<br>5.5        |
|       | フェロクサニウム 7AZ             | 0.8, -0.01        | 0.21~0.26            | -28        | 530                | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> | 5.1~5.2<br>5.6        |

[注] \* [(NiO)<sub>1-x</sub>(CoO)<sub>x</sub>]<sub>1-y</sub>(CoO)<sub>y</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## 6.6 磁石応用

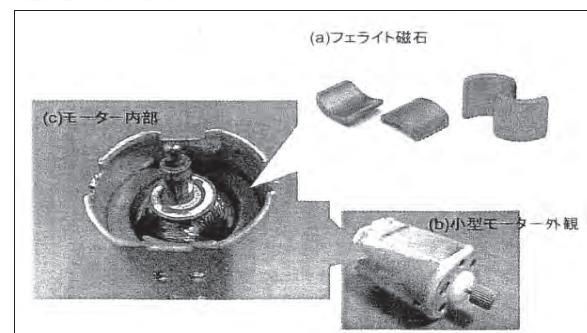
フェライト磁石は Fe と Sr あるいは Fe と Ba の複合酸化物である。フェライト磁石は NdFeB に代表される希土類金属磁石と比較すると発生できる磁力は弱い、高いコスト・パフォーマンス、化学的安定性といった特長を有している。フェライト磁石は小型モータ用として広く使用されているが、特に自動車分野においてはフェライト磁石の特長が低コストと信頼性の両立というニーズと合致しており、フェライト磁石を用いた小型 DC モータが数多く利用されている。

フェライト磁石の高性能化はその特性の理論値の制約から一時期、限界が囁かれていたが、1997 年、La ドープ Sr 系フェライト磁石の開発によりその壁が打ち破られた。これを契機にフェライト磁石の性能はさらに向上し、モータ設計技術の向上と相まって小型モータのダウンサイジング、高性能化が進んでいる。

モータは磁気的な吸引力と反発力を利用し、電気エ

ネルギーを機械エネルギーに変換する装置である。磁界は電磁石で発生させることもできるが、永久磁石はエネルギーを加えなくても磁界を発生し続けるため、永久磁石を利用することでモータの効率を改善することができる。図 6.9 (a) に小型モータ用フェライト磁石の例を示した。磁石は 図 6.9 (c) のようにモータ内部に組み込まれる (図はブラシ付き DC モータの例)。

磁石の性能は磁力の強さを示す残留磁束密度 Br と外部磁場に対する安定性を示す保磁力 H<sub>cj</sub> により表わされる。モータの動作中、磁石はコイルが発生する逆磁界にさらされるため、H<sub>cj</sub> が低いと減磁という磁力の低下が起きてしまう。この減磁の起こりやすさは磁石の形状にも関係し、薄肉化するほど減磁しやすくなる。H<sub>cj</sub> が高ければ減磁は起こりにくいため、磁石を薄肉化することが可能となり、モータ径を小さくすることができる。一方、Br が高ければ磁石が発生する磁束量が多くなり、モータの高トルク化に寄与する。トルクを同等とするのであれば、モータ長を短くできる。つまり磁石の性能が高ければ、モータの高性能化、小型・軽量化が可能となる。



(a) ブラシ付き DC モータ用のフェライト磁石。完成したフェライト磁石はそのままでは磁気を帯びていない。使用に際して外部から磁場を加えて着磁を行い、所定の方向に磁化させる。(b) ドライヤーに組み込まれていたブラシ付き DC モータ。(c) モータ内部に組み込まれたフェライト磁石

図 6.9 小型モータ用フェライト磁石の例<sup>13)</sup>

一般に広く使用されているフェライト磁石は六方晶系の Sr フェライト SrFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> または Ba フェライト BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> である。1951 年に Ba フェライトが開発され<sup>10)</sup>、1966 年にはより特性の高い Sr フェライトが発表された<sup>11)</sup>。フェライト磁石は酸化鉄を主原料とするため安価であるという特長がある。

図 6.10 に現在広く用いられている永久磁石材料と部品を示した<sup>12)</sup>。一口に小型モータと言っても様々な用途、性能、サイズのものがある。磁石はその目的にあったものが使われており、主に磁気特性、コスト、信頼性のいずれを重要視するかを基準に選定される。コストは高くも高性能化や小型化が追求される用途には NdFeB 焼結磁石や NdFeB ボンド磁石が用いられ

る。一方、フェライト磁石は主に低コストが要求される用途に用いられる。

フェライト磁石には酸化物であるため化学的な安定性に優れるという別の特長もある。低コストと信頼性の双方が要求される自動車用モータのニーズに小型のDC ブラシ付きフェライト磁石モータが合致しており、自動車用小型モータの多くにフェライト磁石が使用されている。

Sr フェライト磁石の特性例を 表 6.3 に示す<sup>13)</sup>。モータの用途・設計に応じて必要とされる Br や H<sub>cJ</sub> の値が異なるため、同一グレードでも異なる特性バランスの材質が用意されるのが普通である。表にも見られるとおり一般に Br と H<sub>cJ</sub> は相反関係にある。



図 6.10 代表的な永久磁石材料と部品<sup>12)</sup>

表 6.3 フェライト磁石の磁気特性の例<sup>13)</sup>

| Al量 | $B_r$ (mT) | $H_{cJ}$ (kA/m) | $(BH)_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> ) |
|-----|------------|-----------------|-----------------------------------|
| 少   | 440        | 263             | 36.7                              |
| 中   | 420        | 318             | 33.4                              |
| 多   | 400        | 358             | 30.3                              |

湿式異方性ストロンチウムフェライト磁石の磁気特性の一例。(BH)<sub>max</sub><sup>13)</sup>は最大エネルギー積である。これらの数値は同一の材質グレードのものであり、モータの設計によって最適な特性バランスの磁石が選定される。特性バランスの調整は一般に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加などにより行われる。

市場要求を背景に組成技術、粉碎技術、微細構造制御技術などを駆使して高性能化が進められた結果、1990 年代半ばにはフェライト磁石の特性は工業ベースにおいてはほぼ飽和してしまった。従来のフェライ

ト磁石の高性能化はいかに特性を Sr フェライトの理論値に近づけるかというものだったからである。

そのような状況の中、1997 年にブレイクスルーが成し遂げられた。Sr フェライトに La と Zn を複合的に含有させることで飽和磁化と異方性磁界（それぞれ Br と H<sub>cJ</sub> の理論上の限界値）を改善できることが明らかとなった<sup>14)</sup>。その後 La-Co 含有 Sr 系フェライトも開発された<sup>15)</sup>。この LaCo 系や LaZn 系 Sr フェライト磁石は 1999 年に工業化され、モータ設計技術の進歩と相まってモータの小型・軽量化、高性能化がさらに進んだ。LaCo 系フェライト磁石の開発はその後も続けられ、最近では Br 470mT、H<sub>cJ</sub> 380kA/m といった高性能の磁石が発表されている<sup>16)</sup>。フェライト磁石を使用した小型モータは今後、一層の小型・軽量化、高性能化が進むものと期待される。

#### 〈参考文献〉

- 1) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦：“フェライト”、丸善 P88 (1986)
- 2) 七條祐三、佐藤齊：“フェライト”、日刊工業新聞社 P196 (1959)
- 3) 後藤英一：電気通信学会電子計算機専門委員会 (1954-07)
- 4) 児玉高志：セラミックス Vol. 41P634 (2006)
- 5) F. J. Bertaut and Forrat :Compt. Rend., Vol. 242 P382 (1956)
- 6) 日立金属製品紹介：日立金属技報 vol. 24 P68 (2008)
- 7) 文献 1)、P109 (1986)
- 8) 横山弘毅、広瀬順夫、千葉脩：東芝レビュー Vol. 25 P1386 (1970)
- 9) 桜井良文、金丸文一 共編：“磁性材料セラミックス”、オーム社 P183 (1986)
- 10) J. L. Went, G. W. Ratenau, E. W. Gorter and G. W. van Oosterhout :Philips Tech. Rev. Vol. 13 P194 (1951)
- 11) A. Cochart :J. Appl. Phys. Vol. 13 P1112(1966)
- 12) 住友特殊金属三十年史 (1995)
- 13) 増澤清幸：セラミックス誌 Vol. 42 P798 (2007)
- 14) 田口仁、武石卓、諏訪建一郎：日本応用磁気学会誌 Vol. 21 P901 (1997)
- 15) Y. Ogata, Y. Kubota, T. Takami, M. Tokunaga and T. Shinohara :IEEE Trans. Mag. Vol. 35 P3334 (1999)
- 16) 長谷川統久：FC レポート Vol. 26P83 (2008)



# 7 フェライトの特殊な応用

## 7.1 積層チップインダクタ<sup>1)</sup>

積層チップインダクタは、1970年代後半から急速な電子機器のポータブル化による実装部品への小型軽量化の要求を背景に、画期的な工法技術と材料技術開発により1980年代初めに商品化された。

インダクタ（コイル）図7.1は、フェライト、セラミックスなどのコアに巻かれた導線に電流を流すことにより発生する電磁気的作用を利用したインピーダンス素子である。この原理のためにコンデンサ、抵抗など他の受動部品に比べ構造が複雑となり、SMD化は比較的遅れていた。



図 7.1 積層チップインダクタ<sup>2)</sup>

積層チップインダクタは、ワイヤの巻線を一切用いず、フェライトと導体材料をミクロンオーダーで積層するという積層集積技術を駆使して、超小型 SMD を実現した。機械的巻線が一切なく、積層パターンのファイン化が行えば、小形化が可能であるという大きな利点があり、小型、軽量化に向いている。

1980年代初め、ポータブルラジオ、ヘッドホンステレオから採用が始まり、現在でも携帯電話などでも広く採用されている。

1970年代後半にワイシャツのポケットに入るポータブルラジオが発売された。産業用、軍事用電子機器でしか用いられていなかった表面実装という部品実装技術が、このポータブルラジオの発売を契機に、一般民生電子機器でも広く使われるようになった。表面実装技術とは、表面実装部品（SMD：Surface Mounted

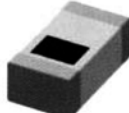
Device）を用いた実装技術で、プリント基板上につくられたランドと呼ばれる導体パターンに、電子部品を直接載せてはんだ付けする。スルーホールを必要としないことから、部品実装密度が大幅に増大し、基板の小型化、電子機器の小型化が大幅に進んだ。

受動部品では、コンデンサ、抵抗から SMD 対応が進められた。しかし、インダクタは、フェライトなどのコアに巻かれた導体に電流を流すことにより発生する電磁気的作用を利用するという原理のために他の受動部品に比べ構造が複雑になるので、SMD 対応は比較的遅れていた。

1980年代にインダクタの SMD 対応の一つの手段として、積層工法を用いたインダクタ（積層チップインダクタ）が開発された。それ以降、現在でも多くの電子機器で使用されている。

積層チップインダクタは使用周波数帯域により、表 7.1 に示すように磁心材料にフェライトを用いる場合とガラスセラミックスを用いる場合とにより分けられる。前者の積層フェライトインダクタは、材料の高周波損失が大きいため、対応周波数が数 MHz から数百 MHz 帯域で使用される。チョークコイル用途、マッチング回路、フィルタ回路、コンデンサと組み合わせて共振回路などに用いられる。磁気シールド構造により高密度実装が可能で、Q も高く、機器の小型・軽量化に最適なインダクタである。形状としては、1005 形状（1.0 × 0.5mm）、1608 形状（1.6 × 0.8mm）、2012 形状（2.0 × 1.25mm）がある。

表 7.1 積層チップインダクタの種類<sup>2)</sup>

| 品名   | 積層フェライト<br>コイル                                                                        | 積層セラミック<br>コイル                                                                        |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 外観   |  |  |
| 使用材料 | High Q<br>磁性体<br>フェライト材                                                               | Low Loss<br>誘電体<br>セラミック材                                                             |
| 内部導体 | Ag                                                                                    | Ag                                                                                    |
| 主な用途 | 電子機器全般                                                                                | 携帯電話など                                                                                |

積層チップインダクタは、使用材料により2種類に分類される。磁性体フェライト材を用いる数 MHz から数百 MHz の周波数帯域で使用される積層フェライトコイルと、誘電体セラミック材を用いる数百 MHz 以上で使用される積層セラミックコイルである。

積層フェライトコイルの長所としては、磁気シールド構造であること、直流抵抗  $R_{dc}$  が低いことがあげら



れる。また、電極が磁性体フェライトの内部に封じ込められているので、磁気シールド型（閉磁路構造）となっている。したがって、部品どうしのクロストークが少なく、高密度実装に最も適した構造となっている。

後者の積層セラミックチップインダクタは、高周波損失の小さい低誘電率セラミックスを用いているため、数百 MHz から数 GHz で使用することができる。これほど高い周波数では、コア材としてフェライト磁性体材料を使用できず、高周波特性に優れた誘電体セラミック材料を用いる。誘電体セラミック材の中に3次元的に内部導体を構成することで、極少チップ形状の積層チップインダクタを実現している。携帯電話の小型・軽量化とともに、チップ形状の小型化は急速に進んでおり、すでに 0402 形状（0.4 × 0.2mm）という極少形状品のマスプロ化が行われている。0402 形状積層チップインダクタの写真を 図 7.1 に示す。しかし、需要の主流は、まだ 0603 形状であり、同形状でインダクタンス値は 1 ~ 100nH まで系列化され商品として取りそろえており、鉛フリーはんだにも対応している。

積層フェライトコイルと積層セラミックコイルの電気的特性の違い、製品ラインナップを、それぞれ 図 7.2、表 7.2 に示す<sup>2)</sup>。

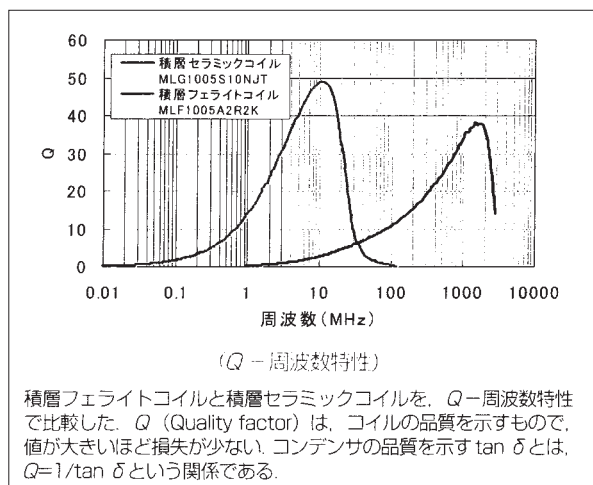


図 7.2 電気的特性<sup>2)</sup>

表 7.2 積層チップインダクタのラインナップ<sup>2)</sup>

### ○積層フェライトコイルラインナップ

| 形状   | 寸法                         | インダクタンス ( $\mu H$ ) | 公差                  |
|------|----------------------------|---------------------|---------------------|
| 1005 | 1.0x0.5x0.5mm              | 0.1~2.2             | $\pm 10\%$          |
| 1608 | 1.6x0.8x0.8mm              | 0.047~33            | $\pm 5\%, \pm 10\%$ |
| 2012 | 2.0x1.25x0.85<br>or 1.25mm | 0.047~100           | $\pm 5\%, \pm 10\%$ |

### ○積層セラミックコイルラインナップ

| 形状   | 寸法            | インダクタンス (nH) | 公差                              |
|------|---------------|--------------|---------------------------------|
| 0402 | 0.4x0.2x0.2mm | 1.0~12       | $\pm 0.2nH, \pm 0.3nH, \pm 5\%$ |
| 0603 | 0.6x0.3x0.3mm | 0.3~100      | $\pm 0.2nH, \pm 0.3nH, \pm 5\%$ |
| 1005 | 1.0x0.5x0.5mm | 0.6~390      | $\pm 0.2nH, \pm 0.3nH, \pm 5\%$ |
| 1608 | 1.6x0.8x0.8mm | 1.0~270      | $\pm 0.3nH, \pm 0.5nH, \pm 5\%$ |

積層フェライトコイルと積層セラミックコイルのそれぞれのラインナップを示す。携帯電話に使用される積層セラミックコイルは、小型形状化が急速に進んでいる。

積層チップインダクタの製造プロセスを、図 7.3 に示す。積層チップコンデンサの製造プロセスに似ているが、大きく異なるのが、ビアホール加工である。



図 7.3 製造プロセス<sup>2)</sup>

積層チップインダクタの場合、内部電極を3次元的に螺旋状に構成する必要がある。そこで、シートにビアホールを開けて、上下方向の導通を確保する。ビアホール形状は、レーザー照射による方法が主流である。

内部電極材質は、銀 Ag を用いるのが一般的である。Ag は導電率が高いので、銅損を低く抑えることができ、 $Q$  を高めることができる。

Ag の融点は 962℃ である。したがって、内部電極として Ag を用いるためには、焼成温度を 900℃ 以下にする必要があり、その温度で焼成できるフェライト材、セラミック材が開発された。一般にフェライト磁心としては比抵抗が大きく高周波損失の小さい NiCuZn フェライトが用いられる。しかし、NiCuZn フェライトの焼成温度は 1100℃ 前後のため、Ag の融点より低い 900℃ 以下で緻密な焼結が可能な材料技術が要求されており、製造条件を適切にすることにより可能となった。

積層フェライトコイルは、DC-DC コンバータ用途の電流対応チョークコイルの用途が多くなってきている。電流対応のために、フェライト材料の開発、耐電流対応の積層構造の提案などが行われ、今後ともこの用途で継続して使用されると考えている。

## 7.2 電波吸収体<sup>3)</sup>

デジタルメディアの急速な普及によって、電子機器から発生する各種ノイズなど電磁環境問題が深刻化している。デジタルメディアのアンテナから発生す

る電磁波だけでなく機器内部の電子回路のインピーダンス不整合による輻射ノイズなどもその一因である。そこでこのような電磁波対策として複合フェライト材料を利用した各種ノイズ対策部品が開発されている。複合フェライトは、従来の焼結フェライトでは実現できなかった UHF 帯以上の周波数帯域において自然共鳴による磁気損失が得られるため近年電波吸収体として多用されている。現在フェライト電波吸収体は、TV 放送、各種無線および各種レーダーなどの通信分野、電気電子機器のノイズ対策やノイズ評価の EMC 試験分野で実用化され発展してきている<sup>4)</sup>。

図 7.4 に示す EMC 試験用電波暗室では、フェライト電波吸収体と誘電損失体を組み合わせた複合電波吸収体の実用化されている。今日では EMC 試験用電波暗室において、フェライト電波吸収体は欠かせない存在となっている。その他、フェライト電波吸収体の実用化としては、図 7.5 に示す東京湾横断道路アクアライン換気塔により発生する航空レーダーの偽像障害対策や、図 7.6 に示す東京都庁舎のような超高層ビルによる TV 放送波の反射障害 (TV ゴースト障害) 対策などに実用化されている。



EMC 試験用電波暗室は、床面が金属または大地と等しい電波反射特性を有する面が必要とされ、フェライト電波吸収体と誘電損失体を組み合わせた複合電波吸収体を 5 面に配置している。

図 7.4 EMC 試験用電波暗室<sup>4)</sup>



羽田空港航空レーダーの東京湾横断道路アクアライン換気塔により反射偽像障害に対してフェライト電波吸収体の実用化されている。

図 7.5 航空レーダー偽造防止用フェライト電波吸収体<sup>4)</sup>



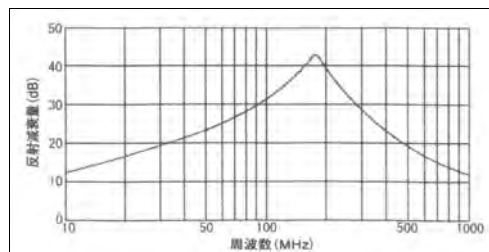
東京都庁舎や新宿パークタワーホテルのような 200m を越える超高層ビルによる TV ゴースト障害に対してフェライト電波吸収体の実用化されている。

図 7.6 TV ゴースト防止用フェライト電波吸収体<sup>4)</sup>

フェライト電波吸収体は、酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) と 2 価の金属酸化物  $\text{M}^{\text{II}}\text{O}$  ( $\text{NiO}$ ,  $\text{ZnO}$  など) を混合し、千数百度の高温で焼結した固体であって、化学式は  $\text{M}^{\text{II}}\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  であり、タイル形状などに加工して用いられる。フェライト電波吸収体の物理的性質は、外装磁器タイルと類似の性質を示す。このため、外装磁器タイル同等に化学的安定性があり、複素比透磁率の経年変化が少なく耐久性にも優れている。

フェライトの複素比透磁率  $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$  は、損失項である  $\mu''_r$  の値が VHF 帯 (30MHz ~ 300MHz) で大きく、また、 $\mu'_r$  と  $\mu''_r$  の周波数特性が電波吸収体として機能する条件に合致しているため広い周波数範囲で優れた電波吸収性能を有する。代表的なフェライト電波吸収体の 2 価金属の配合には、Ni-Cu-Zn 系、Mn-Zn 系および Ni-Zn 系があげられる。

図 7.7 に代表的な Ni-Cu-Zn 系フェライト電波吸収体の電波吸収特性を示す。EMC 試験用電波暗室においては、VHF 帯の低い周波数領域で反射減衰量を大きくでき、かつ厚さを 6mm 程度と薄くできる Ni-Cu-Zn 系フェライト電波吸収体が主流となっている。



EMC 試験用電波暗室においては、VHF 帯 (30MHz ~ 300MHz) の低い周波数領域で反射減衰量を大きくでき、かつ厚さを 6mm 程度と薄くできる Ni-Cu-Zn 系フェライト電波吸収体が主流となっている。

図 7.7 Ni-Cu-Zn 系フェライト電波吸収体の電波吸収特性<sup>4)</sup>

フェライト電波吸収体で特に要求される性能は、入カインピーダンス特性である。EMC 試験用電波暗室では、電気電子機器の放射ノイズを評価する周波数範囲



帯が 30MHz - 40GHz と、極めて広域となることから、フェライト電波吸収体が単独で 사용되는ことは稀である。このため、誘電損失体（カーボンなどの導電性材料を発泡体に混合ないしは含浸させたもの）と組み合わせた複合電波吸収体が用いられている。複合電波吸収体は、それぞれの損失材料のインピーダンスマッチングが重要となり、30MHz - 300MHz 程度の低周波領域ではフェライト電波吸収体が、300MHz 以上の高周波領域では誘電損失体が効率よく電波を吸収するように設計されている。したがって、フェライト電波吸収体の入力インピーダンス特性は非常に重要となる。

RFID は ID 情報をもつタグ（IC タグ）による近距離無線通信システムで、膨大な情報量を瞬時に処理できるため流通や履歴管理に利用される<sup>5)</sup>。使用される周波数は、電磁誘導方式の HF 帯（135KHz、13.56MHz）と電波方式の UHF 帯（860MHz ~ 960MHz、2.45GHz）があり、必要とされる通信距離やシステムコストによって使い分けられている。また、IC タグに電池を内蔵しないパッシブ方式と内蔵するアクティブ方式にも分類できる。前者の通信距離は数 mm - 数 m 程度と、後者の 10m - 100m に比べ短いものの、小型化でき安価でなおかつ電池の交換が不要なため長期間使用できるという特長をもっている。現在の主流はコストや法的届出の不要な 13.56MHz のパッシブ方式のシステムであり、今後も各分野に広がっていくと予測される。身近なものでは「Suica」や「PASMO」の非接触 IC カードシステムに採用されており、JR・私鉄・バスで利用されている。また「Edy」などの電子マネー機能も併せ持つことでその利便性は拡大し、カード形態のみならず、Felica 対応携帯電話「おサイフケータイ」にも普及したことから我々の生活に必要な不可欠な技術となりつつある。

13.56MHz 通信の原理である電磁誘導方式とは、IC タグとリーダーライターのアンテナコイルを磁束結合させて信号を伝達する方式である。ただ通常の IC タグは自由空間内で用いることを前提に設計されているため、金属部品に接する場合、図 7.8 (a) のように、受信時の入射磁束で励起された IC タグアンテナの導電ループコイルに流れる電流の方向に対して、隣接する金属部品側にそれとは逆方向の鏡像（イメージ）電流が発生するため磁束が打ち消され、通信距離が短くなったり作動しなくなる現象が起こる。例えば携帯電話などの小型機器に搭載する場合は必然的に高密度実装となるため、プリント基板などの金属部品と隣接させて設置せざるを得なくなるとともに、限られた設置

スペースに収めるためより薄い IC タグモジュールにする必要がある。そこでこれらの課題を解決するために、高透磁率の軟磁性材料がもつ電磁干渉抑制特性の磁気シールド効果を利用し、基板やシート状の層を IC タグアンテナと金属板の間に配置する 図 7.8 (b) の構造が考えられた。この構造では入射磁束は透磁率材料の層内を通り端面からリターンするため、金属部品に貼付しても通信は可能となる。

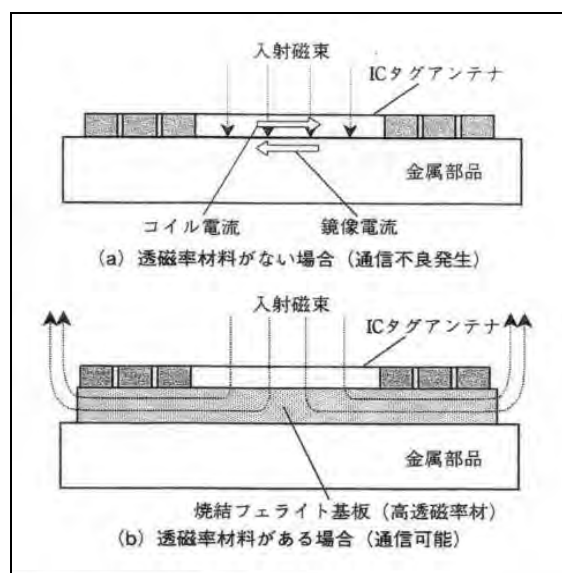


図 7.8 IC タグアンテナと磁束のイメージ<sup>5)</sup>

磁気シールド効果をもつシートとしては、金属磁性粉とバインダーから構成されるものが知られており、柔軟性があることから磁気シールド以外にもノイズ抑制シートとしてなど多方面で使われている。ソフトフェライト焼結体は、金属磁性粉混練シートに比べ損失が低く透磁率が高いことからさらに優れた磁気シールド効果が得られ、IC タグの通信距離を長くできる材料として注目されそのニーズが急速に増えている。

### 7.3 磁性流体<sup>6)</sup>

磁性流体は、強い磁気感应性と液体の流動性とを併せ持つ複合材料である。強磁性体の超微粒子（直径 10nm）の表面を界面活性剤の単分子層でコートし、液体に分散させたコロイド溶液である<sup>7)</sup>。すなわち、磁性流体は約 10nm 程度の強磁性微粒子の表面をオレイン酸などの界面活性剤で被覆して、水や油などの液相中に安定に分散させたものである。通常の重力や磁界で凝集・沈降が起こらず、見かけ上強磁性を示す液体としてふるまう。その磁気特性は超常磁性的な挙動を示し、磁化曲線はヒステリシスを示さない。強

磁性微粒子として、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、多元スピネルフェライトのような酸化物系軟磁性材料と、Fe、Co、Ni のような金属系磁性材料が研究されてきたが、化学的安定性、量産性、経済性などの点で酸化物系磁性材料（特に  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）が優れており、これが実用化されている。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の合成は湿式法によって行われる。 $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$  が 1 : 2 のモル比になるように調整した硫酸塩水溶液に過剰のアルカリ（NaOH）を加えた後、60℃程度に加熱して粒子を成長させる。原液濃度、pH、液温、反応時間などを制御すれば、約 10nm の  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  微粒子を懸濁するスラリーが得られる。このスラリー中へオレイン酸ソーダの水溶液を添加すると、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の表面が親水性なので、オレイン酸イオンの親水基（カルボキシル基）が内側に、親油基（鎖状炭化水素基）が外側になるように、オレイン酸イオンが  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  表面に吸着される。 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  表面に一層だけオレイン酸イオンを吸着させた粒子は親油性になる。オレイン酸イオンの添加量が多いときは第 2 層が形成される。第 2 層は親油基を内側に、親水基を外側にして吸着されるので、2 層吸着した粒子は親水性になる。共存する塩類を水洗除去した後、脱水、真空乾燥すれば表面処理した  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  粒子が得られる。

磁性流体を大別すると溶媒に水を用いた水ベース磁性流体とケロシン、エステルなどの有機溶剤を用いた油ベース磁性流体になる。溶媒は磁性流体の用途に対応して、粘性、耐熱性（蒸発性、酸化性、可燃性）、毒性などの項目を考慮して選定される。前記の表面処理済粒子を溶媒中に分散させると磁性流体になるが、その分散を完全に行わないと、良好な磁性流体は得られない。分散不良は磁性体粒子の凝集沈降など好ましくない現象をひき起こすので、遠心分離などによって、分散不良の粒子を完全に除去しておくことが望ましい。

磁性流体の応用は力学的性質の応用から物性の利用へと発展しつつあり、近年、磁性流体の特異な物性に着目して、センサ、ダンパ、プリンタ、潤滑、医療、比重差選別、表示装置、冷却媒体、回転軸シール、磁気記録現象などへの応用が試みられているが、現在最も進んでいるのは回転軸シールである。図 7.9 に示すように、回転軸の外周に永久磁石とポールピースを配置して、回転軸とポールピースの間に生じた磁界で磁性流体を固定することによって回転軸をシールする構造になっている。特に粉塵を嫌う精密機器の軸シール方式として賞用されている。

磁性流体の関連でナノフェライト粒子が期待される応用分野は医療分野で、診断・治療に利用される。す

でに実用化されているのは、

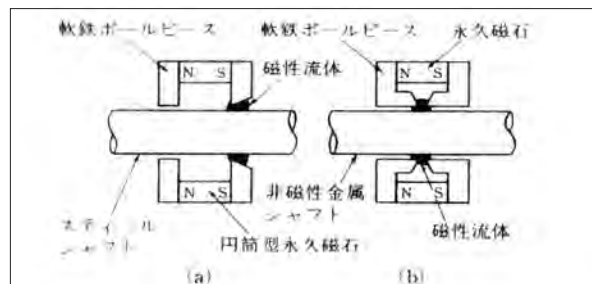


図 7.9 軸シールの構造例<sup>6)</sup>

(1) 輸血血液の検査～HIV ウイルス、肝炎ウイルスのスクリーニング

(2) MRI（磁気共鳴画像診断）造影剤～癌診断

であり、(1) は (in vitro) での使用、(2) は市販されてる製剤であり、薬事法で体内 (in vitro) で使用することが承認されている。また、研究段階にあるのが、

(3) 温熱治療（ハイパーサーミア）

(4) 薬剤輸送（ドラッグデリバリー）

などである。これらの用途では、外部から印加した磁場により分離や輸送が可能、磁気緩和損失やヒステリシス損失による発熱など、磁性に起因する効果に加え、表面効果や反応効率が大いというナノ物質の一般的な性質が応用される。

## 7.4 感温フェライト<sup>8)</sup>

一般の電気機器に用いる磁性材料は、その使用温度領域で磁気特性の変動しないものが望ましいが、反対に一次および二次の磁気相転移の現象が使用温度域にある磁性材料では、わずかの温度変化により温度対磁化の関係が急変し、この特性を利用すれば温度センサとしての利用が可能となる。特にこのような磁気温度センサは磁気特性変化を種々の方式で検出できるため、高性能の磁気センサを作製することができる。磁性材料には、フェライト、金属磁性材料、薄膜などいろいろあるが、ここでは現在実用化が進んでいるフェライト応用の感温フェライトについて述べる。

温度変化により比較的低い温度領域でその磁気的特性を変えるフェライトとしては、Mn-Cu 系、Ni-Zn 系、Mn-Zn 系がある。いずれもキュリー温度においてその強磁性を失う、いわゆる磁気二次相転移の現象を示す特性のものである。キュリー温度も -20℃より 150℃近傍のものまでが容易に得られており、このうち実用化されているのは Mn-Zn 系フェライトである。Mn-Zn 系フェライトの飽和磁束密度と透磁率の温度変化を図 7.10 に示す。



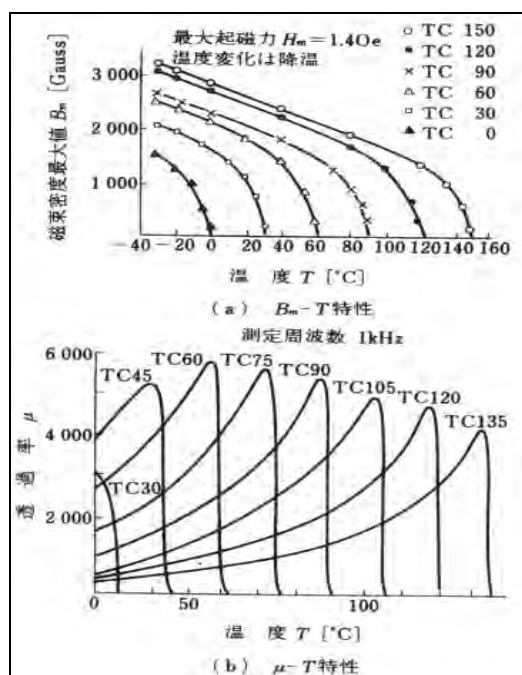


図 7.10 サーマルフェライトにおける磁気量の温度特性<sup>8)</sup>

フェライトを温度センサとして利用する場合には、図 7.10 に示した温度対磁気量の特性と、熱入力に対する動的な応答特性とを分類して考え、これを併せて用いることが必要である。すなわち

- (1) 磁気特性の利用についての分類
  - ① 飽和磁束密度  $B_m$  の温度依存性
  - ② 保持力  $H_c$  の温度依存性
  - ③ 透磁率  $\mu$  の温度依存性
- (2) 熱入力に対する応答についての分類
  - ① 熱入力に対する応答の速いもの
  - ② 入力に対する応答の遅いもの

上記の(1)は磁気材料固有の基礎特性であり、(2)は比熱、熱伝導率、熱放散係数など材料の熱的な性質に関係する項目である。

フェライトの温度センサ応用としては、熱入力に直接に磁気特性変化に比例した出力信号として得る方式と、フェライトを直接にあるいは複合磁路としてあらかじめ交流電源で励磁しておき、熱入力に比例した磁気特性変化を変調された出力信号として得る二つに大別される。後者は励磁電源を高周波化することにより少量の磁心で所望出力を得ることができるため、熱応答特性のよい温度センサを作製することができる。

温度の計測・制御には、これまでバイメタルやサーミスタなどの感温素子が実用化されているが、磁気材料の温度変化による磁気特性変動を利用した感温フェライトの特長を列挙すると次のようになる。

- (1) キュリー温度が温度基準なので温度基準値を有している。

- (2) フェライトは周波数特性を有したインダクタンス素子である。
- (3) キュリー温度近傍での特性が急変するので、わずかの温度変化で大きな出力変化が得られ、温度検出感度が優れている。
- (4) 熱入力に対する磁気特性変化として、飽和磁束値、保磁力、透磁率など多種の出力を得ることができる。

感温フェライトの代表的な応用例は 図 7.11 のリードスイッチである。

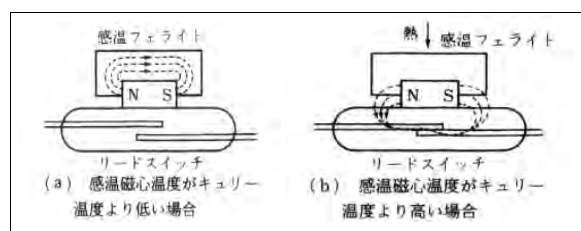


図 7.11 サーマルリードスイッチの動作説明<sup>8)</sup>

## 7.5 フェライト化反応の廃水処理への応用<sup>9)</sup>

工場などから排出される廃液中の重金属イオンによる公害は、大きな社会問題となっており、厳しく規制されているが、重金属イオンの種類によっては、通常の廃水処理方式では除去率が不十分なことがある。例えば、いくつかの重金属を含む酸性廃水にアルカリを加え、これらを水酸化物として沈殿させようとする場合、重金属の種類によっては最適沈殿条件（主として pH）が著しく異なり、一括処理ができないことがある。また、これらの重金属の水酸化物沈殿は、一般に非常に細かく、ろ過分離が困難である。さらに、これらの沈殿は中性、酸性の水に再溶解するため、沈殿のまま投棄することができない。一方、フェライトは水に溶けにくいので、廃水中の重金属イオンをフェライトにして除去することができれば、この方法は多くの利点をもつ廃水処理方式となりうる。例えば、再溶出の心配がないばかりか、フェライトは強磁性物質であるため、磁気的に沈殿物を分離することができる。そこで、フェライト化反応を利用した廃水中からの重金属除去が考案された<sup>10)</sup>。図 7.12 にフェライト法の処理を図示した。重金属を含む廃水に硫酸第一鉄を加えた後、アルカリによって中和し、空気酸化すれば、重金属を含有した強磁性沈殿物が析出するので、磁力を用いることによって処理水から沈殿物（フェライト）のみを回収することができる。ただし、この方法の処理効果は廃水に含まれる重金属の種類によって異なり、その結果

は表7.3にまとめられている。この中でAとBに属する金属イオンは高濃度でない限り、フェライト法によって有効に処理できると考えられている。この方法の原理は、既述の共沈法と同様であり、このときの内容は良好な原料を用いてフェライトの高性能化を図ることにあった。しかし上記のようにフェライト中に不純物（重金属）を含有させて安定化すれば、フェライト処理した廃棄物となるわけで、さらにこのフェライト（品質的に問題がある）を他の材料と複合したりすれば、用途によっては再利用できるとされている。このように同じ技術でも、目的によっては全く異なる応用に結びつけられることを示したもので、注目に値する研究成果である。

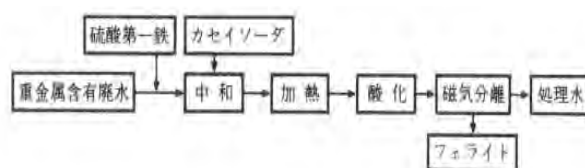


図7.12 フェライト処理法フロー<sup>10)</sup>

表7.3 フェライト法の処理効果による分類<sup>10)</sup>

| 処理効果 |                       | 金属元素                                                 |
|------|-----------------------|------------------------------------------------------|
| A    | フェライト法がきわめて有効         | Fe Mn Co Ni As Pb Cd Cr Bi V Mg<br>Cu Ce Sn Ti Ba In |
| B    | フェライト法がある程度有効         | Y Gd Se Sr Ge La Zr Sm Ga Al Ca                      |
| C    | 処理効果の小さいもの            | W Te Mo                                              |
| D    | 処理を期待できないもの           | Na K Rb Cs B Hg                                      |
| E    | フェライト法を妨害するため注意を要するもの | Si P Ta Nb Sb                                        |

本法は実験室規模の少量廃水処理はもちろんのこと、都市ゴミ焼却場の廃水処理など、いろいろな試みがなされている。これらは、単に公害問題の解決に寄与するだけでなく、大量の副生フェライトをもたらすだけに、その応用研究も含めた今後の展開が期待される。

## 7.6 フェライト電極<sup>11)</sup>

水溶液電解におけるアノード材料には、使用条件に応じて電極触媒能が要求されることもあるが、一般に低い比抵抗、高い耐食性および機械的強度が要求される。電気化学工業では通常、貴金属被覆チタン、グラファイト、過酸化鉛、マグネタイトなどの電極が用いられてきた。高純度の原料を用い、適切な化学組成を選択し、適当な雰囲気条件下で焼成を行うことによって低抵抗かつ、耐食性、強度の大きい、特に耐食性の点で他の電極材料に比べて非常に優れたフェライト電極材料が製造できることが明らかになり、実用化されている<sup>12)</sup>。

表7.4に各単元フェライトにおいて、2価金属化合

物を10 mol%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ を90 mol%と組成を一定にした場合の比抵抗、耐食性、曲げ強度および耐熱衝撃特性について比較した結果を示す。なお、鑄造マグネタイトにおけるそれぞれの特性についても比較のため記載した。Niフェライトが総合的に見て優れていることがわかる。

表7.4 各種単元フェライトと鑄造マグネタイトの諸特性<sup>12)</sup>

| 物質                    | 比抵抗<br>[ $\Omega\cdot\text{cm}$ ] | 耐食性<br>(溶出量) <sup>a)</sup><br>[mg/A $\cdot$ d] | 曲げ強度<br>[kgf/mm <sup>2</sup> ] | 耐熱衝撃性   |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|---------|
| Mgフェライト <sup>b)</sup> | 0.3                               | 9.5                                            | 410                            | 優れている   |
| Znフェライト               | 0.02                              | 9.0                                            | 320                            | やや劣る    |
| Mgフェライト               | 0.02                              | 7.3                                            | 350                            | やや優れている |
| Coフェライト               | 0.015                             | 6.0                                            | 380                            |         |
| Niフェライト               | 0.02                              | 4.3                                            | 470                            | 優れている   |
| 鑄造マグネタイト              | 0.11                              | 137.0                                          | 125                            |         |

a) 3% NaCl, DA: 5 A/dm<sup>2</sup>

b) 単元フェライト組成: 0.1 MeO-0.9 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

表7.5は各種電極材料の耐食性を比較したものである。これより明らかなように、フェライト電極の溶出量は白金被覆チタン電極に比べると大きい、グラファイト、マグネタイトなどに比べるとはるかに小さくなっている。フェライト電極は他の電極と比較して、耐食性に優れることが最大の特徴であり、さらに、溶出物の毒性、経済性などの点でも優位にあり、次のような用途に用いられている。公害防止関係で電解を利用した廃水処理や海水の淡水化が広く行われているが、難溶性アノードとしてフェライト電極が実用化されている。温水器などのタンク内面の腐食を防ぐため、外部電源法による防食法が採用されているが、この方式における電位印加用のアノードとしてフェライト電極が使用されている。脈流電流に対する安定性は電源の簡略化につながり、大きな効果をもたらしている。また、電気めっき用電極としてはクロムめっき用や一部の静電塗装用として実用化されており、フェライト電極の利用が拡大されつつある。しかし、フェライト電極にも改良すべき問題はある。例えば、塩素発生における触媒能が小さいことである。この場合、フェライト電極の表面に塩素過電圧の低い材質をコーティングすることにより塩素過電圧を下げることは可能であり、この分野への応用も期待できる。

表7.5 各種電極材の溶出量<sup>12)</sup>

| 電極材料                                                | 溶出量 <sup>a)</sup> [g/A $\cdot$ y] |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| フェライト (0.4 NiO-0.6 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 0.4                               |
| 鑄造マグネタイト                                            | 40                                |
| ステンレス鋼 (18 Cr-8 Ni)                                 | 25000                             |
| 鉛-銀合金 (1.5 Ag)                                      | 30                                |
| 白金被覆チタン                                             | 0.01                              |
| グラファイト                                              | 200                               |

a) 3% NaCl, DA: 5 A/dm<sup>2</sup>

一方、変わった用途の一つに生体電極がある。これは心電図などで代表される微妙な生体電位を計測するときに用いる電極で、耐食性の他に安定で優れた伝導性が要求され、フェライト電極はこの種の用途に好適とされている。

#### 〈参考文献〉

- 1) 一ノ瀬昇、山本孝 編著：“積層セラミックス技術のすべて” 日刊工業新聞社 (2008)
- 2) 望月宣典：セラミックス Vol. 42 P393 (2007)
- 3) 松雄良夫：EMC No. 232 P39 (2007)
- 4) 栗原弘：セラミックス Vol. 43 P217 (2008)
- 5) 土井孝紀：EMC No. 232 P50 (2007)
- 6) 平賀貞太郎、奥谷克伸、尾島輝彦 共著：“フェライト” P229 (1986)
- 7) 日本電子材料技術協会編：“最新電子材料活用辞典” P83 (1992)
- 8) 一ノ瀬昇、小林哲二 共編：“センサ活用の実際” オーム社 P42 (1984)
- 9) 文献 6) P230 (1986)
- 10) 辻俊郎、榊原直孝：エレクトロニクセラミクス Vol. 6 P57 (1975 春号)
- 11) 文献 6) P232 (1986)
- 12) 青木利雄、横山効生：エレクトロニクセラミクス Vol. 8 P9 (1977 秋号)



# 8 フェライトの技術発展と高機能化

## 8.1 フェライトの生産量の推移<sup>1)</sup>

### (1) ソフトフェライト

ソフトフェライトの生産統計を扱っている(社)電子情報技術産業協会によれば、ソフトフェライトの生産は、ブラウン管、VTR用フェライトコアから発展し、現在は回路用小型・ECM用・電源用コアへと用途がシフトしてきている。

図8.1はソフトフェライトが本格的に商品化された1950年から2010年までの生産統計を日本電子材料協会およびJEITAのデータを基にまとめたものである。なお、2010年のデータは推定であり、昨今の不況を反映して下方修正が必要かも知れない。



図8.1 ソフトフェライトの生産金額推移<sup>1)</sup>

図からも明らかなように、1991年をピークに国内でのソフトフェライトの生産は減少を続けており、海外の生産が伸びる傾向にある。国内メーカーの海外シフトが進んでいることを示している。なお、生産統計は日本ファインセラミックス協会もまとめており、フェライトコアの生産額は2006年89.3億円、2007年71.5億円、2008年(見込)82.2億円となっている<sup>2)</sup>。

また、1991年当時はCRT用ブラウン管に使用される偏向ヨーク・フライバックトランスやVTRのロータリートランスなどが大きなウェイトを占め、それらAV機器が最近のデジタル化の進展に伴い、液晶、PDPなどの薄型テレビやDVDレコーダに置き換わっていったため減少を続けた。ただし、液晶テレビのバックライト用やデジタル化によるノイズ消去用としての用途は増加している。

図8.2に2000年と2007年の用途別生産金額を示す。この表からも上記の動向が窺い知れるが、この5～6

年の間に急速にデジタル家電用やEMC用への生産がシフトしている。

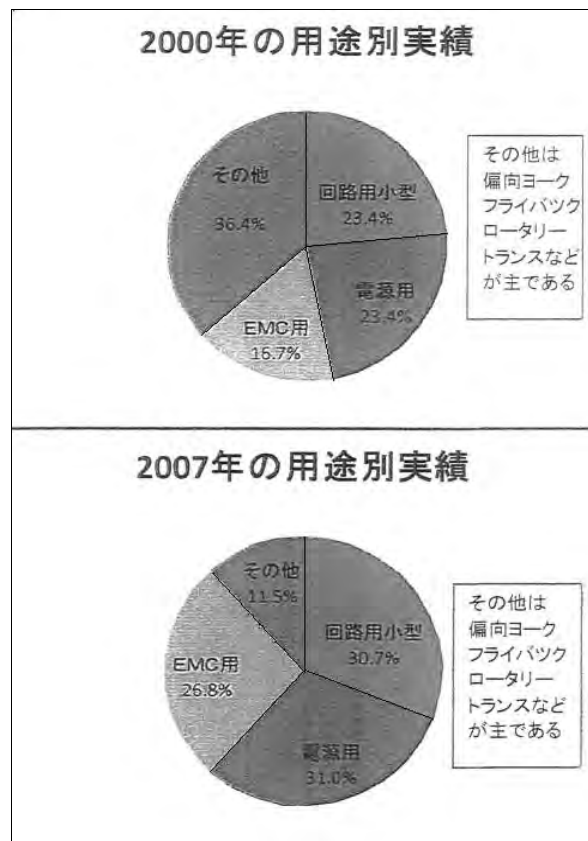


図8.2 ソフトフェライトの用途別占有率<sup>1)</sup>

今後は、薄型テレビ等の民生用電子機器の伸びが力強く牽引されると思われ、日系メカは、世界的なノイズ規制、原油高騰に伴う省エネ対策としてのパワーエレクトロニクス分野、テレビの薄型化に対する関連部品等々で、製品的にも世界をリードし、優位性を確保しているため、さらに拡大していくものと思われる。

### (2) フェライト磁石

永久磁石は、希土類磁石とフェライト磁石に大別され、それ以外に鑄造磁石がある。磁石の歴史はAlnico磁石に代表される鑄造磁石から始まり、スピーカなどの音響機器用を中心に広く使われていた。1970～1980年代前半は、価格の安さからフェライト磁石が圧倒的な地位を占めるようになった。1980年代後半からは、その高特性を生かして希土類磁石が台頭し、現在では80%を占めるまでに成長した。図8.3は、ソフトフェライトの統計と同様、日本電子材料工業会とJEITAの生産統計をベースに1950年から2010

年迄の日本の永久磁石生産の推移を示す。鑄造磁石は、生産量が減少しているため、2007 年より統計の対象から外されている。なお、日本ファインセラミックス協会の統計<sup>2)</sup>では、フェライト磁石の生産統計は2006 年 137.9 億円、2007 年 124.7 億円、2008 年（見込）124.1 億円となっている。

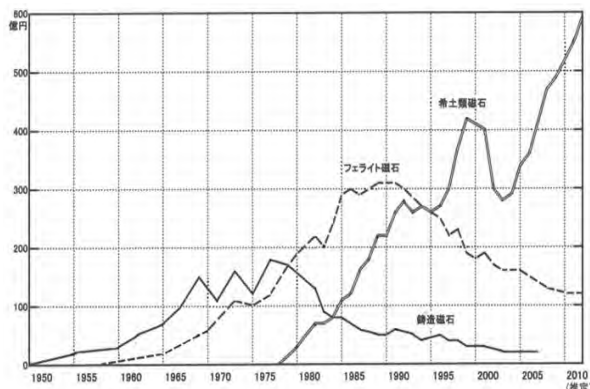


図 8.3 永久磁石の生産金額推移<sup>1)</sup>

近年、希土類磁石は他材質からの置き換わりが進むとともに、ハードディスクの駆動用モータ（VCM）や、自動車の EPS およびハイブリット車のモータに使用されるなど、ハイテク機器の部品から電動機器の省エネ対応の設計に対応して市場が大きく広がっている。それに対して、フェライト磁石は横ばい状態が続いている。

フェライト磁石と希土類磁石の用途別シェアは 図 8.4 のとおりである。

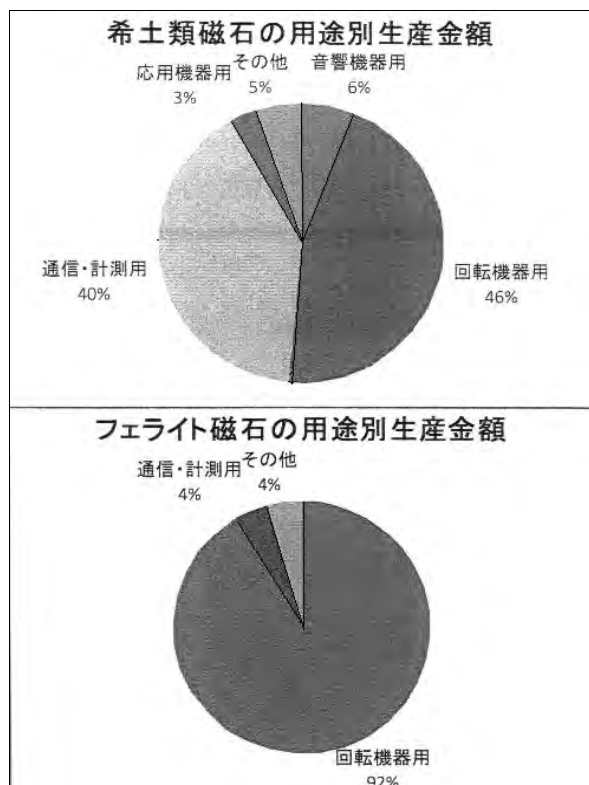


図 8.4 磁石材質別の用途別生産金額<sup>1)</sup>

希土類磁石では、回転機器用（モータ用）が 45% と半分近くを占めている。これは上述のとおり自動車用や家電製品用モータへの採用が大きく寄与している。続いて通信・計測用が 40%と続いているが、これは主に VCM 用である。2000 年当時は、通信・計測用が 50%を占めていたが、回転機器用が大きく伸びたため、占有率も 10%程度ダウンした。

今後の課題として、希土類磁石であるネオジム磁石が、原料のネオジムとジスプロシウムをほとんど中国に依存しており、最近その価格が大暴騰するとともに、2007 年に中国が輸出税を導入するなど新たな問題が起きている。

フェライト磁石では、回転機器用が 92%と大半を占めている。スピーカ用など安価な磁石から日系メーカーは撤退し、その代わり、フェライト磁石でも La ドープ Sr フェライト系のような高性能な磁石<sup>3)</sup>にシフトしていき、自動車用のモータがその大部分を占めるようになった。

## 8.2 日本のフェライト産業の強み、弱み

### 8-2-1 中国におけるソフトフェライト産業事情<sup>4)</sup>

最近のソフトフェライト業界は、多くの会社が海外に進出し、日本の倍以上の生産を中国で行うようになってきた。業界の動向を調査するのに、もはや日本国内だけ見ては不十分な時代になってきたと言える。

このような状況を踏まえて、日本電子材料工業会（現 JEITA）フェライト技術委員会では中国への調査団を派遣し、ソフトフェライトの市場・技術動向や原料の動向を調査した。ここでは中国磁性材料・部品行业协会（CMMDA）から得られた情報をまとめた。

#### (a) 生産推移

現在中国国内で約 100 の企業がソフトフェライトを生産しており、生産量は 1980 年の 3,500 t から 2000 年には 60,000 t と急激な増加の一途をたどっている。この背景には、1990 年代から中国が世界の生産工場となり、日本の TDK、FDK、トーキンおよび欧州のフィリップスや台湾企業等の海外メーカーが進出したことにあり、また、中国の開放政策により急激に国内需要が増加したことにもある。1980 年からの中国でのソフトフェライトの生産量推移を 図 8.5 に示す。

中国磁性材料・部品行业协会（CMMDA）の会員企業のソフトフェライトの売上高は約 23 億元（約 345 億円）、その他会員外の企業が約 32 億元（480 億円）であり、会員外企業の内訳は国営企業が 9 億元 28%（135 億円）、民間企業が約 12 億元 38%（約 180

億円)、海外企業との合併会社が約 11 億円 34% (165 億円)と思われる。しかし、今後の中国の発展とともに、この売上高順序は変化していき合併会社、民間企業の売り上げ比率が増加し、国営企業は減少していくと思われる。参考として CMMDA 会員企業の 1996 年および 2000 年の民間、国営、合併企業の売上高を 表 8.1 に示す。

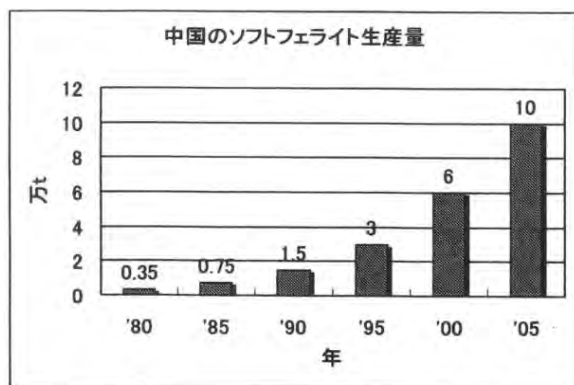


図 8.5 中国ソフトフェライト生産量<sup>4)</sup>

表 8.1 国営、民間、合併企業の売上高<sup>4)</sup>

|      | 1996年  |       | 2000年  |       |
|------|--------|-------|--------|-------|
|      | 売上(億円) | 比率(%) | 売上(億円) | 比率(%) |
| 国営企業 | 3.5    | 50    | 6      | 25    |
| 民間企業 | 2.8    | 40    | 9      | 40    |
| 合併会社 | 0.7    | 10    | 8      | 35    |
| 合 計  | 7.0    | 100   | 23     | 100   |

#### (b) 磁気特性

中国国内工場では電源用フェライト磁気特性は、TDK 製 PC30 の同等品が生産可能である。初透磁率  $\mu_i$  は高い製品で 8,000 ある。また、一部の工場では 12,000 の製品が生産可能であり、PC40 同等品の生産も可能である。

PC30 の特性を基準とした場合、PC30 を上回る製品を A ランク品、同等の製品を B ランク品、PC30 より劣る製品を C ランク品、さらに、 $\mu_i$  が 10,000 以上の物を A ランク品、8,000 以上が B ランク品、8,000 以下の物を C ランク品とした場合、各々の生産比率は、20%、50%、30%となる。海外企業、合併会社および国営企業は A、B ランク品を生産しており、民間企業のほとんどは C ランク品を生産しているが、一部の民間企業では A、B ランク品も生産している。

#### (c) 酸化鉄の製造

ソフトフェライトの主な原料は、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Mn}_3\text{O}_4$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{ZnO}$  等であり、特にマンガン鉱石の埋蔵量は中国が世界 4 位 (5.9%) である。中国製の Mn304、 $\text{MgO}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\text{ZnO}$  を原料として使用した場合、Mn-Zn フェライトの特性および供給量については問題なく使用で

きるが、重量比約 70%をしめる  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  は特性および供給量についての問題が、中国フェライトの発展に大きな障害となっている。

従来中国での酸化鉄製造方法は、Chemical 法が主であったが最近では Ruthner 法による酸化鉄の製造も行っており、特に上海宝钢天通磁業では宝山鋼鉄からの Ruthner 法による酸化鉄粉を利用し Mn-Zn の造粒粉およびコアの製造も手掛けている。

ソフトフェライト用酸化鉄の製造方法別の生産量 (2000 年) は、次のとおり 50,000 t である。

|            |          |
|------------|----------|
| Ruthner 法  | 20,000 t |
| Chemical 法 | 10,000 t |
| 共沈法        | 5,000 t  |
| その他の方法     | 15,000 t |

また、酸化鉄の生産推移は 図 8.6 のとおりである。

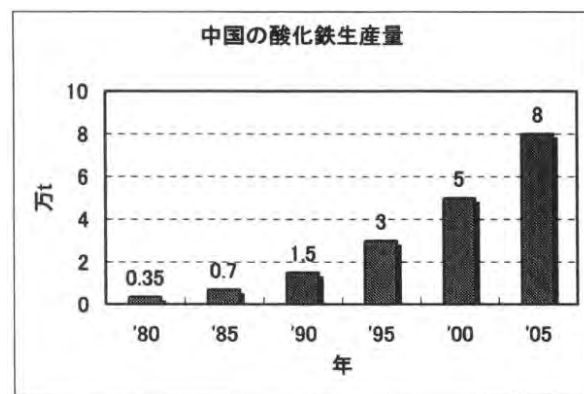


図 8.6 中国の酸化鉄生産量推移<sup>4)</sup>

Ruthner 法でつくられた酸化鉄で、宝山鋼鉄のものが脱 Si を備え、ソフトフェライトに使用できるが、それはほとんど浙江天通電子へ売られており、他のフェライトメーカーは韓国 (東部製鋼 (Dongbu)、三洋産業 (POSCO)) および日本 (NKK (当時) 等) から購入しているものと思われる。なお、日本と韓国の酸化鉄の価格差は、40 ~ 50 ドル/t である。

中国の電子工業部が定めた国家規格である SJ/T10383-93 によってソフトフェライト用酸化鉄は、YHT1、YHT2、YHT3 と種別されており、各々の生産量は 10,000、30,000、10,000 t である。

表 8.2 に SJ/T10383-93 の規格表を示す。

表 8.2 酸化鉄規格 (SJ/T10383-93)<sup>4)</sup>

|                                          | Style   |         |         |
|------------------------------------------|---------|---------|---------|
|                                          | YHT1(%) | YHT2(%) | YHT3(%) |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                  | 99.2    | 99.0    | 98.5    |
| $\text{SiO}_2$                           | 0.01    | 0.02    | 0.04    |
| $\text{CaO}$                             | 0.014   | 0.02    | 0.05    |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                  | 0.01    | 0.02    | 0.06    |
| $\text{TiO}_2$                           | 0.01    | 0.01    | 0.02    |
| $\text{SO}_4^{2-}$                       | 0.01    | 0.01    | 0.02    |
| $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ | 0.02    | 0.04    | 0.1     |
| $\text{MgO}$                             | 0.015   | 0.03    | 0.01    |



中国国内でも、質のよい酸化鉄を生産することができ、製品の安定供給および品質の均一性が悪く、現在は日本、韓国および台湾からの輸入に頼っている。また中国の WTO 加盟により以前より輸入品が安く手に入るため中国でも、コストダウン競争の波にさらされている。

(d) 今後の中国製フェライト事情について

#### ① 国内企業について

製造メーカーの大手は、次の 3 社であり、現在の生産量は次のとおりである。

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| 浙江天通電子有限公司 (TDG)     | 15,000 t / 年 |
| 浙江東洋磁性企業集団公司 (TMEGC) | 10,000 t / 年 |
| 金寧無線電器材廠 898 廠       | 8,000 t / 年  |

#### ② 合併会社および海外企業について

日本企業の中国工場建設の例として、TDK は自社工場を大連にテレビ用の偏向ヨークコアを年間 3,000 万個生産できる工場を建設し、廈門では、Mn-Zn フェライトを月産 350 万個生産している。また、FDK は金寧無線電器材廠と年間 2,100 万個の偏向ヨークコアを生産できる合併会社を立上げ、日本セラミックは上海磁性材料と合同で Mn-Zn フェライトを年間 1,000 t 生産し、今後近いうちに 3,000 t 規模の生産工場に拡張予定である。最近では、江蘇省に自社工場建設予定であり、生産量は合計 5,000 t に増産予定である。欧州企業として、フィリップスは 27 億円投資し南京に工場を立上げ、偏向ヨークコアの生産を行っている。他に台湾企業との合併会社が 10 社以上あり、年間 15,000 t 以上の Ni-Zn および Mn-Zn コアを生産している。

#### ③ 電子機器装置の発展について

2002 年、中国におけるソフトフェライトの調査の段階で、今後 2005 年までに、電子機器装置の発達に伴いフェライトの需要が伸びると考えられ、2005 年までの間に、電源用フェライトコア、EMI 用コア、および高級ディスプレイ用偏向ヨークコア、チップインダクタなどの開発が急ピッチで進められ、これにより、中国国内でのソフトフェライトの生産量は、100,000 t に増加することが見込まれている。電子機器装置の出荷台数から計算される 2005 年までのソフトフェライトの需要見込みが表 8.3 に示されている。

表 8.3 ソフトフェライトの需要見込み<sup>4)</sup>

| 電子機器      | 使用量(kg) | 2000年  |          | 2005年  |          |
|-----------|---------|--------|----------|--------|----------|
|           |         | 台数(万台) | 使用量(t)   | 台数(万台) | 使用量(t)   |
| カラー-TV    | 0.6     | 3,700  | 22,200   | 5,600  | 33,600   |
| 白黒TV      | 0.4     | 1,600  | 6,400    | 1,600  | 6,400    |
| ラジオ       | 0.2     | 1,500  | 3,000    | 1,500  | 3,000    |
| レコーダ      | 0.2     | 1,500  | 3,000    | 1,500  | 3,000    |
| アンプ       | 0.15    | 1,500  | 2,250    | 2,500  | 3,750    |
| 電話交換機     | 0.02    | 4,800  | 960      | 6,400  | 1,280    |
| 携帯電話      | 0.02    | 5,600  | 1,120    | 10,000 | 2,000    |
| VTR&VCD   | 0.2     | 2,000  | 4,000    | 2,500  | 5,000    |
| ディスプレイ    | 0.4     | 3,900  | 15,600   | 5,000  | 20,000   |
| コンピュータ    | 0.4     | 860    | 3,440    | 2,000  | 8,000    |
| トランス      | 0.02    | 30,000 | 6,000    | 50,000 | 10,000   |
| トランス(輸出)* | 0.08    | 28,000 | 24,000   | 52,000 | 41,600   |
| コア(輸出)    |         |        | 20,000** |        | 30,000** |
| 合 計       |         |        | 111,970  |        | 167,630  |

\* インダクタ及びソフトフェライトの輸入を含む

\*\* 海外メーカーの輸出も含む

#### (e) 調査のまとめ

調査報告書にも記載されているが、今回の調査でわかったことは、中国国家における磁性材料の研究拠点が北京でも上海でもなく、四川省綿陽という遠く離れた地域にあることと、そこには IEC / TC51 の国内事務局があることであった。この綿陽市には中国西南応用磁学研究所 (South west Institute of Applied Magnetic Research of China : SIAM) があり、中国における磁性材料研究の中心となっている。研究所の概要は下記のとおりである。

- ・この研究所は、北京にあった国営の研究所から 1967 年に磁性材料部門が分離して綿陽に移転してきた。
- ・国営の第 9 研究所という位置づけである。
- ・現在 1,300 人の所員がいる。
- ・研究所の組織は、11 の研究開発部門と 4 つの製造会社 (ソフトフェライト、マイクロ波材料、デバイス、希土類磁石、製造設備) を有している。
- ・IEC/TC51 (磁性部品およびフェライト材料) の中国事務局を所管している。
- ・1999 年に ISO9001 を取得した。

中国におけるフェライトの研究開発、生産は現状では戦後の日本企業のように何にでも向かっていくといった姿勢である。一方、品質および特性についてはまだ日本企業には追いついていないが、時間の問題である。

### 8-2-2 フェライト系ボンド磁石の産業事情

#### (a) ボンド磁石とは<sup>5)</sup>

ボンド磁石とは、永久磁石粉末をプラスチック、ゴムなどと混合し成形した磁石で、結合材および磁石粉末の種類により図 8.7 のように分類される。ボンド磁石は寸法精度が高く、機械加工が容易な反面、バインダーとして非磁性物質を 2 ~ 15 重量%含んでいるので、磁石性能は焼結磁石や鑄造磁石に比べて劣ることになる。

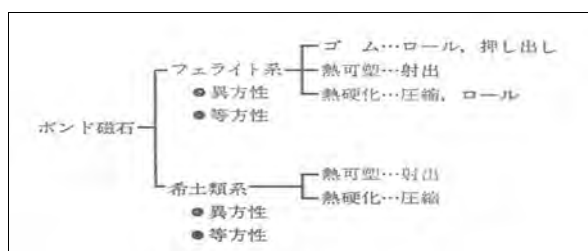


図 8.7 ボンド磁石の分類<sup>5)</sup>

日本ボンド磁性材料協会の統計<sup>6)</sup>によると、わが国のボンド磁石の生産額は図 8.8 のように、ここ数年は日系海外を含めると 500 億円を超え増加している。

フェライト系ボンド磁石の国内生産は Rigid と Flex を合わせて 150 億円程度でここ数年は横ばいである。Rigid と Flex とを比較すると、圧倒的に Rigid の生産高が多く、その内訳は表 8.4 の如く、OA 機器用のモータが主体となっている<sup>7)</sup>。

フェライト系ボンド磁石は、図 8.7 の分類でもわかるとおり、バインダーの種類によりゴム系とプラスチック系に別れるので、それらについて簡単に紹介しておく。

## (b) フェライト系ゴム磁石 (Flex)

まず、ゴム磁石について詳しく述べよう。ゴム磁石に使われる磁性粉は粒径  $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$  のバリウムフェライトやストロンチウムフェライトである。これらのフェライト粉末の形状は六方晶系の結晶構造をもつ六角板状をしており、c 軸方向に磁化容易軸をもっている。粉体化された磁性粉はゴムに高充填されて使用されるため、その粒度分布および平均粒子径の調整が重要である。

ゴム磁石に要求される性能は、まず可とう性をもつことであるが、用途によりさらに、耐オゾン性、耐油、耐薬品性などが必要である。ゴム磁石の結合材料として重要な点は高磁性をもたせるために、磁性粉をできるだけ大量に混入できることである。多量の磁性粉を混入でき、なおかつ可とう性などが失われないゴムの選定が重要である。天然ゴム、ネオプレンゴム、ニトリルゴム、ブチルゴム、ポリイソブチレン、ハイバロン、塩素化ポリエチレンなどが用いられる。ゴム磁石の製造工程を図 8.9 に示す。ゴム磁石には熱可塑性と熱硬化性があるが、成形法は、熱可塑性が押し出しやロール圧延で行われるのに対し、熱硬化性はプレス成形が通常である。

表 8.4 フェライト系ボンド磁石 (Rigid) の生産内訳<sup>7)</sup>

|       |    | 単位 : 重量(トン) 金額(百万円) |       |     |     |     |       |     |
|-------|----|---------------------|-------|-----|-----|-----|-------|-----|
|       |    | 映像                  | 回転    | OA  | 家電  | 自動車 | 吸着・雑貨 | その他 |
| 2004年 | 重量 | 50                  | 1,372 | 100 | 637 | 85  | 2,424 | 356 |
|       | 金額 | 45                  | 616   | 78  | 161 | 76  | 1,466 | 470 |
| 2005年 | 重量 | 85                  | 720   | 165 | 540 | 40  | 2,670 | 360 |
|       | 金額 | 80                  | 288   | 140 | 189 | 33  | 2,140 | 430 |

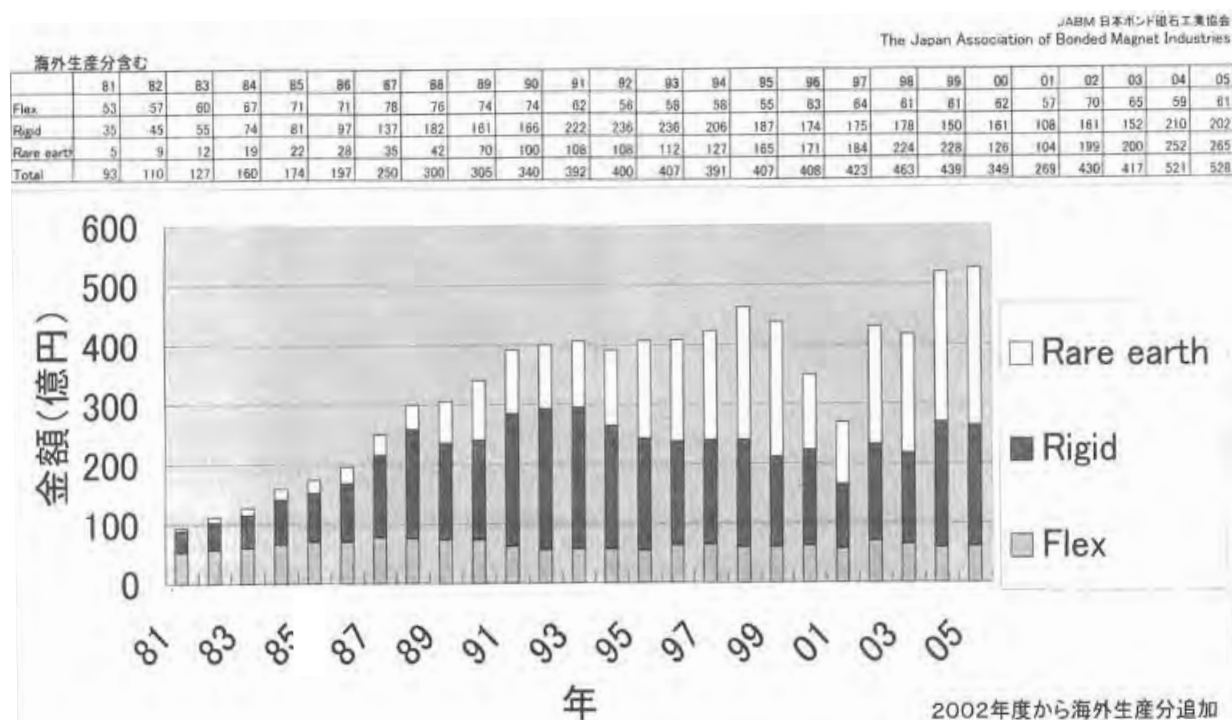


図 8.8 ボンド磁石の生産額の推移<sup>6)</sup>

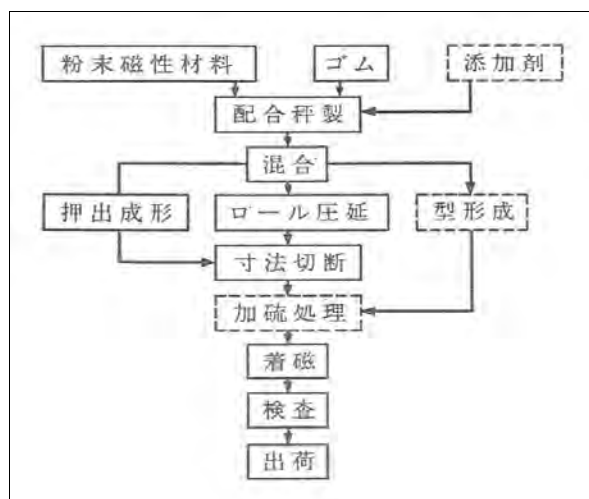


図 8.9 ゴム磁石の製造工程図<sup>5)</sup>

ゴム磁石の磁性を向上するには、微粒子磁石の容易磁化軸を磁化方向に揃えること、すなわち配向度を高めることにある。この配向性を向上させる技術には大別して磁場による方式と、機械的手段による方式、および両者を重畳させる方式がある。磁場による方式は、ゴムを加熱して可塑化し、異方性バリウムフェライトがゴムの中で磁場により動きやすくしておき、磁場をかけてフェライトのc軸を軸揃え、直ちに冷却してc軸の揃ったフェライトを固定する方法である。機械的手段による方式は、ゴム磁石を圧延、押出しなどの機械加工によってc軸を揃える方式である。フェライト磁石は六方晶でc軸を中心として側面が六面体となっており、結晶の長さ(L)と直径(D)の比(D/L)が $\geq 1$ である。このためゴム磁石の混練材をロール加工すると平行面の大きいc軸面が圧延面に平行になる確率が高く(図 8.10)、繰り返し圧延加工を行って加工度が高くなるに従い、配向度が増大する。このように圧延面の垂直方向にc軸が整列することを利用すると異方性ゴム磁石が得られる。

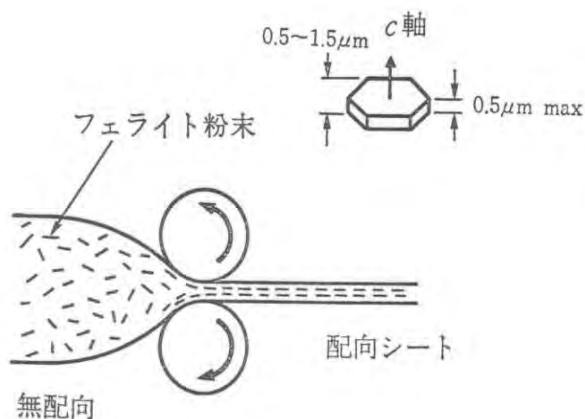


図 8.10 ロール加工によるフェライトゴム磁石の製造<sup>5)</sup>

表 8.5 は、代表的なゴム磁石の磁気特性とゴム物性を示したものである。これらのうちコードとシート(A)は一般に長尺状で使用されるもので、特に強力な磁気特性は不要であるが最も利用度の高いものである。シート(B)は近年開発されたもので、ゴム磁石としては最大エネルギー積 1.0 MGOe と大きく、吸着力が大きい。

表 8.5 ゴム磁石の材料特性<sup>5)</sup>

(a) 磁気特性

| 項 目                          | コ ー ド | シート(A) | シート(B) |
|------------------------------|-------|--------|--------|
| 残留磁束密度 $B_r$ [G]             | 1,600 | 1,500  | 2,200  |
| 保磁力 $H_c$ [Oe]               | 1,250 | 1,250  | 1,800  |
| 最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ [MGOe] | 0.49  | 0.45   | 1.00   |

(b) ゴム物性

| 項 目                        | コ ー ド | シート(A) | シート(B) |
|----------------------------|-------|--------|--------|
| 比 重 [g/cm <sup>3</sup> ]   | 3.90  | 3.70   | 3.55   |
| 硬 度 JIS A                  | 98    | 98     | 97     |
| 引張強さ [kg/cm <sup>2</sup> ] | 3)    | 60     | 70     |
| 伸 び [%]                    | 15    | 20     | 30     |

(c) フェライト系プラスチック磁石 (Rigid)

プラスチック磁石に使われている磁性材は、ゴム磁石と同様にバリウムフェライトとストロンチウムフェライトである。近年、プラスチック磁石の高磁力化を図るため、磁性粉に対するシラン処理剤やチタネート処理剤のような添加剤の開発が進められてきた。これにより、磁性粉とプラスチックとの親和性を高めるとともに流動性を向上させることができるようになったため、磁性粉の充填率を 90 重量%近くまで高めることが可能となっている。結合材料としては、熱可塑性の場合ナイロン樹脂、ポリプロピレン、ポリエチレン、エチン・酢酸ビニル共重合体、ポリフェニレンオキサイドなどであり、熱硬化性材料の場合にはフェノール樹脂、エポキシ樹脂、不飽和ポリエステルなどが用いられる。しかし、機械的強度、磁気特性、量産性、コストの点から実用化されているのは、ナイロン樹脂を結合材料としたプラスチック磁石が大部分を占める。

プラスチック磁石の製造法は、次項で述べる希土類系プラスチック磁石とほとんど同じであるので、ここでは割愛する。

次に、フェライト系プラスチック磁石の特性について述べよう。図 8.11 は、種々のナイロン樹脂とストロンチウムフェライト粉末を使用した場合の磁気特性を示したものである。ナイロン樹脂の種類によって成形物の磁気特性が異なり、12ナイロンで最大エネルギー積が一番大きいことがわかる。また、フェライト



含有量がある値より多くなると最大エネルギー積が低下しているが、これはフェライト粉末の回転の自由度が少なくなるため、外部磁場を印加したときに粉末の配向度が悪くなるためである。

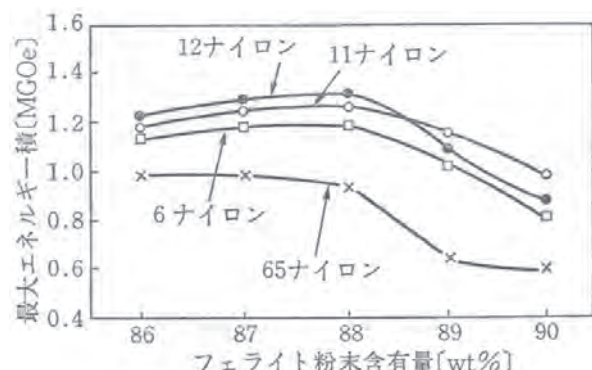


図.8.11 スترونチウムフェライト粉末とナイロン樹脂との成形物の磁気特性<sup>5)</sup>

プラスチック磁石の高性能化に対する研究は盛んであり、最近、最大エネルギー積が 1.9 ~ 2.0 MGoe のフェライト系プラスチック磁石が開発されている。

表 8.6 に各種フェライト系ボンド磁石の特性をまとめて示した。

表 8.6 フェライトボンド磁石性能一覧<sup>5)</sup>

| 項 目                   | シート・ボンド磁石                  |                   |                   | 射出成形タイプ・プラスティック磁石 |                   |                   |                    |
|-----------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|                       | ゴム<br>B21                  | プラス<br>チック<br>B25 | プラス<br>チック<br>B27 | ナイロ<br>ン-6<br>等方性 | ナイロ<br>ン-6<br>異方性 | ナイロ<br>ン-6<br>異方性 | ナイロ<br>ン-12<br>異方性 |
| 残留磁束密度 $B_r$          | [G] 2,400~<br>2,500        | 2,400~<br>2,500   | 2,300~<br>2,400   | 1,300~<br>1,400   | 2,700~<br>2,800   | 2,300~<br>2,400   | 2,700~<br>2,800    |
| 保 磁 力 $aH_c$          | [Oe] 1,800~<br>2,000       | 1,800~<br>2,000   | 2,100~<br>2,300   | 1,000~<br>1,100   | 2,100~<br>2,200   | 1,800~<br>2,000   | 2,100~<br>2,300    |
| $iH_c$                | [Oe] 1,800~<br>2,200       | 1,800~<br>2,200   | 2,400~<br>2,600   | 1,900~<br>2,100   | 2,300~<br>2,500   | 2,100~<br>2,300   | 2,300~<br>2,500    |
| 最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ | [MG·Oe] 1.4~1.5            | 1.4~1.5           | 1.3~1.4           | 0.3~0.4           | 1.7~1.9           | 1.3~1.4           | 1.7~1.9            |
| 引 張 強 度 $\sigma$      | [kg/cm <sup>2</sup> ] 65   | 350               | 350               | 650               | 780               | 650               | 400                |
| 曲 げ 強 度 $\delta_f$    | [kg/cm <sup>2</sup> ] —    | 1,100             | 1,100             | 1,300             | 1,300             | 1,300             | 700                |
| アイゾット衝撃 $\alpha_k$    | [kg·cm/cm <sup>2</sup> ] — | 4.5               | 4.5               | 2.7               | 3.2               | 2.7               | 3.0                |
| 耐 熱 温 度 $t$           | [°C] 100                   | 100               | 100               | (165)*            | (172)*            | (165)*            | (165)*             |
| 密 度 $d$               | [g/cm <sup>3</sup> ] 3.6   | 3.6               | 3.6               | 3.4               | 3.38              | 3.4               | 3.54               |

### 8-2-3 中国におけるフェライト系磁石の産業事情

#### (a) フェライト磁石中国調査<sup>8)</sup>

日本電子材料工業会マグネット部会は 1994 年と 2000 年に中国における磁石の産業動向調査を行っている。調査団が現地に行き得られた結果の概要は下記のとおりである。

##### (i) 中国の経済状況

1998 年 3 月、朱鎔基体制のもと、中国では国有企業、金融体制および政府機構のいわゆる三大改革を推進してきた。当時は国有企業の 6,600 社が赤字で公務員 400 万人の削減による失業者の増加や膨大な不良債権による金融機関の大型倒産などで内外の不信感が増大し、外資の導入も減少傾向にあった。これらの対策

として、物価の上昇、休日の増加による一般消費の増大、密輸防止による公平化等の諸施策を推進し、国有企業 3,600 社が黒字化している。好調な分野は繊維産業で、工作機械および石炭が不調。鉄鋼も宝山を除き経営的に苦しい。

##### (ii) 磁石業界の動向

三環はネオジム磁石関連の会社を統合して中科三環を組織、2000 年 4 月から深圳の市場取引所に上場した。中国のネオジム焼結磁石の生産量は焼結上がりで 5,200 トン/年 (1999 年) と想定される。希土類原料の価格は、1999 年末と比べて Nd が 50%、Dy が 100% 上昇した。特に、Dy の上昇は需給バランスが崩れているためと言われている。この価格の上昇には中国の磁石メーカーも困っている。中小のネオジム磁石メーカーは倒産する可能性がある。三環の磁石性能は、44H、39SH、35UH のレベルである。価格は安い品質面ではまだ日本に劣ることを認識している。

##### (iii) 希土類原料の動向

中国での希土類原料は、北方希土集団と南方希土集団の大きな二つの集団に分かれている。北方希土集団の主要メーカーは、内蒙古包鋼稀土高科技股份有限公司、三峰稀土公司、包頭稀土研究院であり、南方希土集団の主要メーカーは、広東省の中山市山峰稀土公司と江西省贛州公司である。生産量は北方希土集団の方が多く、包頭地区が中心である。希土類製品の種類は 64 品種、130 種類あり中国国内への出荷はもとより、アメリカ、日本、フランス、ドイツなどへ輸出されている。包頭の稀土高科技股份有限公司の希土類生産は、鉄鋼のパイプロを用い、その生産量は、希土類鉱石処理量が年間 10 万トン、希土類化合物が年間 8,000 トン (酸化物換算)、希土類金属関係が年間 2,000 トンである。希土類原料は、政府主導によって小規模体制から大規模体制へ移行され、価格・生産量がコントロールされている。このため、最近の値上がりにつながっている。

一方、中国の政策と需給バランスの変化によって、希土類原料が高騰しており、希土類磁石メーカーは大きな打撃を受けている。現実に中国内の中小磁石メーカーの約半数が倒産の危機に直面していると言われ、最大手メーカーでも大きな損失を被っている。日本の磁石メーカーにおいてもこのような厳しい現実が迫っており、今後協力して原料問題に対応するとともに、ユーザの理解も得ながら健全な産業発展に努力すべきものとする。

##### (iv) 希土類ボンド磁石原料粉の動向

MQI の天津工場では、ジェットキャスター (超急冷薄帯製造装置) 3 台のセットアップが終了し、4 台目

をセットアップ中であった。8月の生産実績は97トンであり、2001年6～7月までには、ジェットキャスターを10台設置する予定であり、その時点で生産能力は400トン/月となる。原料は、近くの鑫宝特殊鋼と北京のBIAM社（北京航空材料研究所）から入れている。

天津工場の生産設備と測定器は、すべて米国MQIと同じ物を輸入して設置しているので、天津での製造品は品質的にも全くUSAアンダーソン工場製と同等品である。磁力検査も、米国MQIで測定した標準サンプルを使用してVSMの較正をして、機差を補正している。しかし、現在はラフな調温しか行っておらず、今後調温・調湿を整備する計画である。

#### (v) 磁石応用製品の動向

中国における磁石の主な用途は、スピーカ、光ピックアップ、携帯電話用振動モータ用である。将来は、電動自転車が伸びると期待している。

関心の強かったDewaxer用は、1989～90年に最高につくられ約1,000台/年、1台当たりの磁石重量は10～100kgである。現在、大慶油田、遼河油田、山東省勝利油田、新疆ウイグル自治区の克拉瑪依油田などで活用されている。今回上海のパイオニアを訪問したが、同社ではDVDプレーヤーの製造を行っており、中国現地の部品調達率は未だ8%と低いが、今後は大幅に増加させる意向が示された。DVD用ピックアップに使用されるネオジウム磁石はすべて日本から仕入れている。また関連会社の東北パイオニア中国工場の情報として、スピーカ用の磁石は、フェライトは中国メーカ、ネオジウム磁石は日本製であることが明らかとなった。しかし、ネオジウム磁石でも、今後は中国国内での製造品を要求することになるだろうとのことである。

#### (vi) 総括

中国最大で、希土類全般にわたる総合的な研究開発機構である包頭稀土研究院に象徴されるように、中国の希土類事業に対する並々な期待と自信、そして事業展開への積極性が強く印象に残った。また、中国政府指導による小規模生産を集約した希土類事業の大規模化と重点化の展開が着実に進展し、完成しつつあると感じた。これに対する日本の希土類磁石メーカは、中国への希土類原料の依存度が極めて高いことから、膨大な資源を背景にする中国希土類各社と今後もますます仲良くし、さらなる交流を深めてゆかなければならない。

一方、中国の政策と需給バランスの変化によって、希土類原料が高騰しており、希土類磁石メーカは大きな打撃を受けている。現実には中国内の中小磁石メーカ

の約半数が倒産の危機に直面していると言われ、最大手メーカでも大きな損失を被っている日本の磁石メーカにおいてもこのような厳しい現実が迫っており、今後協力して原料問題に対応するとともに、ユーザの理解も得ながら健全な産業発展に努力すべきものと考えられる。

中国の磁石産業については日本ボンド磁石材料協会が、ボンド磁石を主にして毎年調査を行っている。それらの中からフェライト系を中心にいくつかの調査結果<sup>9)</sup>を紹介しておこう。まず、中国における生産拠点は表8.7のようになる。また、BM Newsの中 Harada Reportによると、過去4年間の世界のボンド磁石の生産推移は表8.8のようになり中国の伸びが著しい。さらに、中国における2005年度のフェライト焼結磁石とボンド磁石の生産量は表8.9からわかるように、298,000トンと52,000トンとなっており、各々世界一の生産国である。

表 8.7 中国におけるフェライト系磁石の生産拠点<sup>9)</sup>

| Chinese RE & magnet manufacturers production in 2005 in China                                                                        |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| (1) RE main production sites: (1) Baotou(包頭), (2) Jiangxi(江西), (3) Sichuan(四川), (4) Shandong(山東).                                    |  |
| (2) RE production in 2005: 101,300ton REO, Export 49.9%, (23.5% Japan, 14.8% USA, 11.7% EU). +12% increased compared with '04.       |  |
| (3) RE application: Magnet 19.8%, Petrochemical 14.8%, Glass 13.8%, Polishing powder 12.8%, Metallurgy 10.4%, Hydrogen storage 7.9%. |  |
| (4) Sintered magnets production: 33,000ton, block + final parts +33.5%.                                                              |  |
| (5) Sintered main manufacturers: (中科三環), AT & M(安泰), Yunsheng(韻升), Jingci(京磁), Innova(英洛賓) >3,000t                                   |  |
| (6) Bonded main manufacturers: SEM(セイコーエプソン), Galaxy(銀河), Ja Hwa(磁化電子), Samsung(サムソン), Jinbin(津濱), San Huan(三環), Daitou(大有)          |  |
| (7) Special products: HDD, MRI, EV, Levitation Train, Wind Power.                                                                    |  |

表 8.8 世界のボンド磁石の生産額<sup>9)</sup>  
(million \$ / year)

|       |       | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-------|-------|------|------|------|------|
| Japan | F.T.  | 138  | 128  | 136  | 124  |
|       | RE.T. | 61   | 60   | 69   | 59   |
|       | BM.T. | 199  | 189  | 201  | 184  |
| USA   | F.T.  | 217  | 123  | 169  | 166  |
|       | RE.T. | 58   | 25   | 18   | 17   |
|       | BM.T. | 275  | 148  | 186  | 182  |
| EU    | F.T.  | 129  | 119  | 130  | 124  |
|       | RE.T. | 44   | 33   | 33   | 32   |
|       | BM.T. | 173  | 152  | 163  | 156  |
| SEA   | F.T.  | 83   | 91   | 99   | 84   |
|       | RE.T. | 117  | 95   | 84   | 70   |
|       | BM.T. | 199  | 186  | 183  | 154  |
| China | F.T.  | 71   | 95   | 153  | 130  |
|       | RE.T. | 113  | 93   | 112  | 110  |
|       | BM.T. | 183  | 188  | 265  | 240  |
| World | F.T.  | 680  | 596  | 730  | 663  |
|       | RE.T. | 415  | 328  | 374  | 343  |
|       | BM.T. | 1095 | 934  | 1104 | 1005 |

表 8.9 中国におけるフェライト系磁石の生産状況<sup>9)</sup>

| Chinese Ferrite magnet manufacturers production |                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1)                                             | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> shortage is continued in China, importing from USA. Low grade. Steel manufacturers still do not start recycle system.                                                               |
| (2)                                             | High quality SrCO <sub>3</sub> is not available in China.                                                                                                                                                          |
| (3)                                             | New 10 rotary kilns started production last one year. Ferrite is over capacity. More than 50 manufactures. Low grade magnets very sever competition. High quality magnet has not developed yet.                    |
| (4)                                             | Ferrite production in 2005: Sintered 298,000ton, Bonded 52,000ton. (Injection mold bonded only 500ton)                                                                                                             |
| (5)                                             | Price, Yuan/kg: Sintered; Arc 16, Ring 7, Total 9.93<br>Bonded sheet; Anisotropic 16, Isotropic 7, Total 9.25                                                                                                      |
| (6)                                             | New products: (1) Flexible NdFeN+Ferrite, (2) Ultra fine Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> powder, (3) Ba ferrite hexagonal plate powder, (4) Radio wave absorbing materials 4 grade 0.3-18Ghz, sheet, foam, coating. |

中国の中でもフェライト磁石の生産量で No. 1 は中国浙江省東陽市横店にある横店集団で 10 万トンの生産量である。ここではケーススタディーとして横店集団の何時金社長が協会の新年会で語った横店集団のプロファイルを紹介する。

#### (b) 横店集団のプロファイル<sup>10)</sup>

横店集団は現在フェライトの生産では、世界一の規模を誇っている。ハードフェライト年間約 10 万トン、ソフトフェライト年間約 4 万トン、希土類磁石年間約 4 千トンの生産を、品種別に 68 の、整然と整備された工場生産している。応用品の生産は必ずしも多くないが、小型モータ、スピーカ、電池、ダイス用超硬合金、Al フィルム、コンデンサなども生産している。05 年の生産金額は 28 億元、約 450 億円である。売上規模は TDK 廈門よりも小さい。約 80% を輸出し、利益率も高く、中国の電子部品業界では、電波新聞の評価では No. 5 である。従業員は 15,000 人で、横店は「磁石城」と呼ばれている。

現在の成功は簡単に達成できたものではない。会社の設立は 1980 年わずか 5 万元の出資で、田舎の何も特色のない、極めて貧しい横店地区で、フェライト事業を開始した。まず陝西省宝鶏にある磁性材料の国营 4390 工場に何氏を含む 33 名で 1 年間実習を行った。81 年より工場を横店に建設した。最初の 8 年間は全く生産は上がりず、苦戦をした。90 年何氏は総経理に就任し、従業員の教育、品質管理、生産の流れ改善などに力を入れ、95 年売り上げは 9 億元に到達した。その後生産は順調に伸び、06 年ついに 30 億元を突破した。今後も磁性材料、ハード、ソフトフェライト、ボンド磁石および希土類磁石は年率 20% 程度伸びると見ている。市場のニーズに合わせ、増産を継続する。戸田工業とのフェライトボンド磁石および原料の合併

は順調に進行している。

今後中国の磁性材料は、より高性能を目指し、さらに付加価値向上を図らねばならない。低級品は中国製という概念を払拭しなければならない。希土類磁石もフェライト磁石も原材料は中国に豊富に産する。鉄鋼生産も非常に大きい。しかし酸化鉄のリサイクルはまだ確立されていない。これらの立場を生かし、さらなる発展を図りたい。

今後とも横店集団はオープンでいく。学ぶ姿勢も貫いていく。日本の各社と敵対するのではなく、強調していく。

### 8-2-4 日本の技術力

#### (a) 積層化技術<sup>11)</sup>

日本の産業技術で世界的に優位にある分野はいろいろあるが、圧倒的に強い分野の一つに電子部品がある。電子部品の中でもイノベティブなプロセス技術を有する積層電子部品は代表格と言っても過言ではないだろう。

最近のナノテクノロジーの進展と相俟って、数十 nm レベルの粉体を用い 1  $\mu$ m 以下のシートをつくり数十～数百層に積層してつくられた積層コンデンサ、積層コンダクタ、積層バリスタ、積層サーミスタ、積層アクチュエータなどは日本以外の国がマネすることのできない部品である。したがって、国内の電子部品メーカーで世界の生産を独占しているのが現状である。

斜陽傾向にある日本のフェライト産業を復興させるためには日本の強いイノベティブな積層プロセス技術を活用すべきであり、積層チップインダクタに期待がかかっている。

積層チップインダクタは、1970 年代後半からの急速な電子機器のポータブル化による実装部品への小型軽量化の要求を背景に、画期的な工法技術と材料技術開発により 1980 年に商品化された。回路のデジタル化、高周波化とともにセットの小型多機能化の流れが加速度的に増すことにより実装部品に対する高機能化、高周波化、高密度実装性が強く求められ続けている。

積層チップインダクタは使用周波数帯域により、磁心材料にフェライトを用いる場合とガラスセラミックスを用いる場合とに分けられる。前者の積層フェライトチップインダクタは、材料の高周波損失が大きいいため、対応周波数が数 MHz から数百 MHz 帯域で使用される。後者の積層セラミックスチップインダクタは、高周波損失の小さい低誘電率ガラスセラミックスを用いているため、数百 MHz から数 GHz で使用するこ



とができる。

図 8.12 と 図 8.13 に商品化経緯を示す。積層フェライトチップインダクタは 1005 サイズまで小型化されており、従来、積層では困難とされたインダクタンス公差の J 公差化 ( $\pm 5\%$ ) も実現し、チューナなどのトラップ周波数ばらつきを小さくすることに貢献している。積層セラミックチップインダクタは 0402 サイズまで小型化されており、インピーダンス整合用途として 10 nH 以下で商品化、また、チョーク用途として高インダクタンス製品が商品化されている。

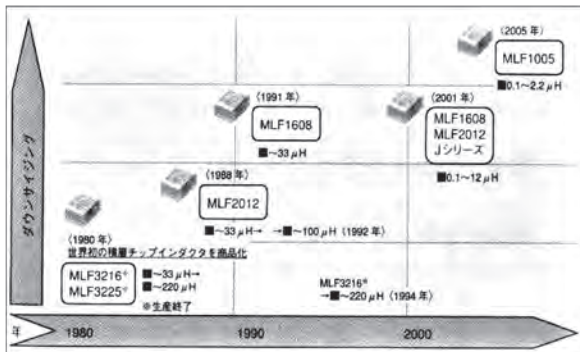


図 8.12 積層フェライトチップインダクタの商品化経緯<sup>11)</sup>

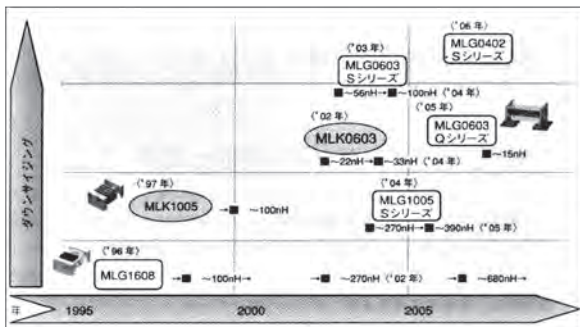


図 8.13 積層セラミックチップインダクタの商品化経緯<sup>11)</sup>

積層フェライトチップインダクタは、図 8.14 に示すように絶縁性の高い Ni-Zn 系フェライト厚膜ペーストと金属導体パターン (Ag) とを半面ずつ交互に印刷して積層化した後、同時焼成することによって初めて実用化された。積層化後の同時焼成では、1,000℃以下での焼成が必要なため、図 8.15 のような組成が選択されている。また、一般にシート作成には 図 8.16 のようなシート成形法がある。一方でスルーホールを開けたフェライトグリーンシート (フェライト粉と有機材料との混合体をシート状にしたもの) に J 字型あるいは U 字型の周回導体パターンを印刷し、これらグリーンシートを積層化することでスルーホールを介して周回パターンを接合、焼結後にフェライト内部に

微細なコイルを形成する方法も確立されている (図 8.17)。しかしスルーホールの形成については、大型のチップ形状の場合には金属金型による穴あけが可能であったが、1005 ケースサイズ (長さ 1.0 mm、幅 0.5 mm、高さ 0.5 mm) のような微小積層インダクタが携帯電話等で要求されるようになったために、グリーンシートのフェライト材料が赤茶色を有し、YAG レーザ光を十分吸収することに着目して、レーザスルーホール形成法が確立された<sup>12)</sup>。図 8.18 に YAG レーザにより形成されたフェライトグリーンシートのスルーホールとスルーホールを介して接合された周回パターンの断面図を示す。PET (ポリエチレンテレフタレート) フィルム上に保持された厚さ 40 ミクロンのフェライトグリーンシートに直径 50 ミクロンのスルーホールが形成されているが、レーザ光線の透過性を有する PET フィルムは、若干の熱的ダメージを受けているものの穴加工がされていない。レーザ穴加工を応用した微小積層フェライトチップインダクタの外観写真を 図 8.19 に示す。

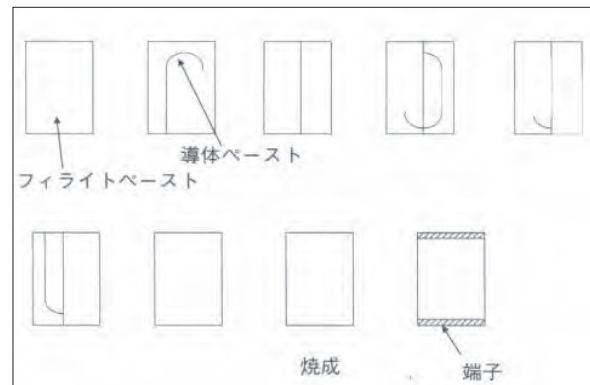


図 8.14 積層フェライトチップインダクタの印刷工法模式図<sup>11)</sup>

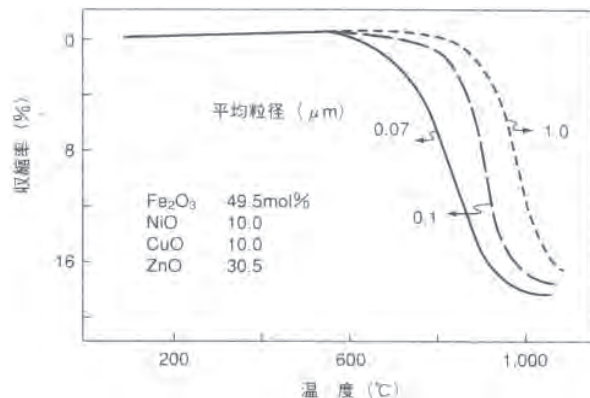


図 8.15 NiCuZn フェライトの熱収縮挙動に及ぼす粉体粒径の影響<sup>11)</sup>

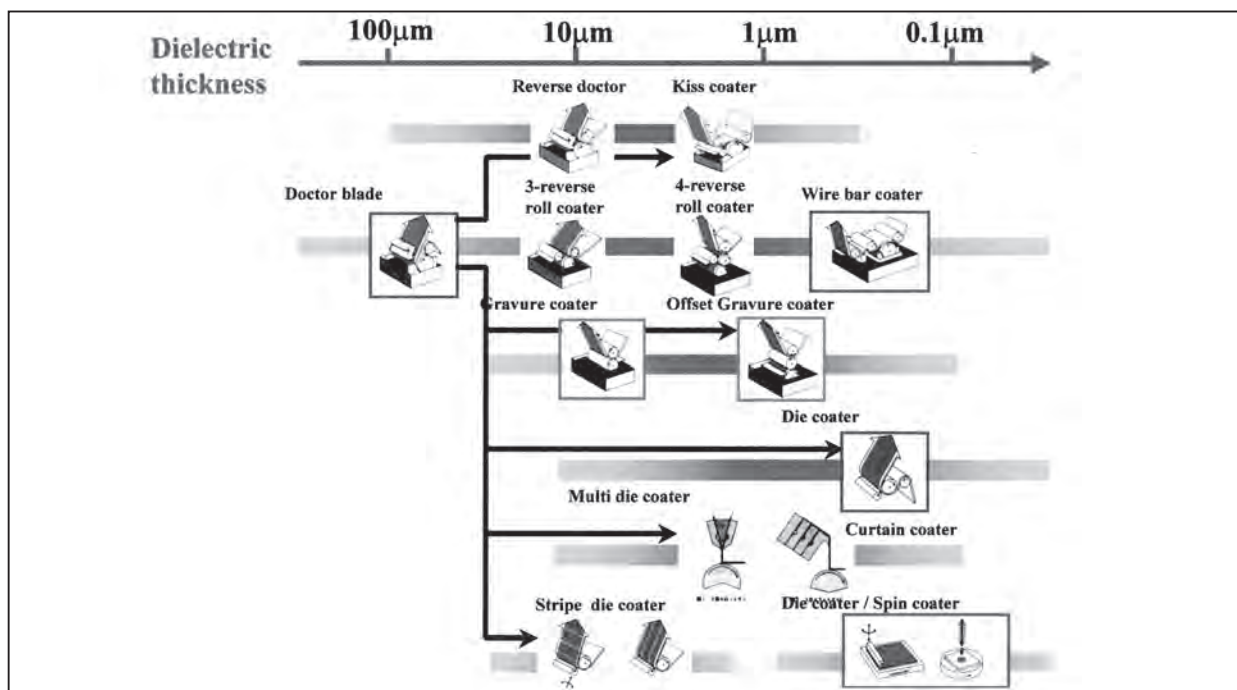


図 8.16 各種シート形成法<sup>11)</sup>

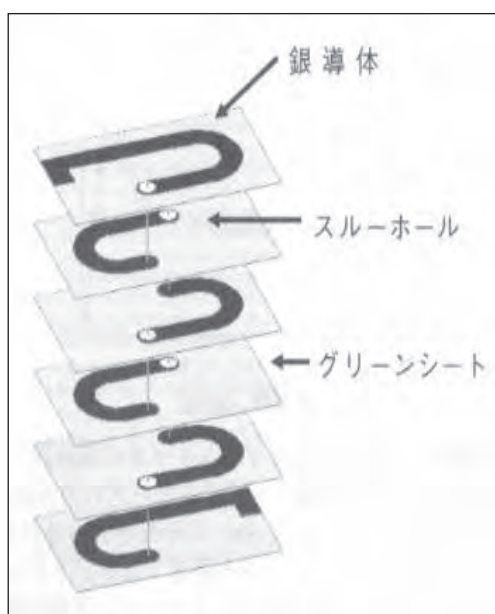


図 8.17 積層フェライトチップインダクタのグリーンシート積層工法模式図<sup>11)</sup>

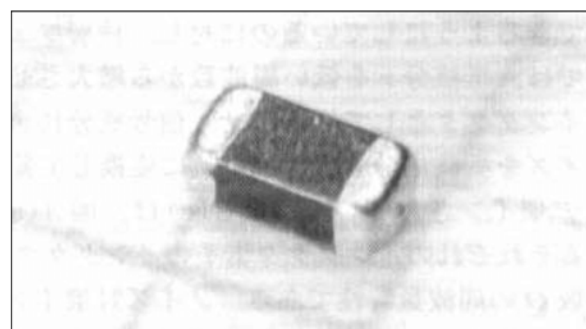


図 8.19 1005 ケースサイズ (1.0mm × 0.5mm × 0.5mm) の積層フェライトチップインダクタの外観図 (方眼紙は 1mm スケール)<sup>11)</sup>

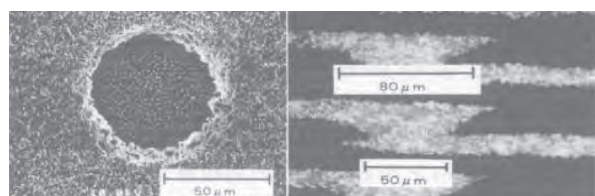


図 8.18 フェライトグリーンシートにレーザ穴あけ工法により形成されたスルーホール (左) とスルーホールを介して接合された銀導体回路パターン断面図 (右)<sup>11)</sup>

フェライトの透磁率は応力歪みにより著しく低下する。それゆえ、金属導体（銀）とフェライトとの同時焼成を行っている積層フェライトインダクタでは、インダクタとして所定のインダクタンス値を安定して得るために金属導体とフェライトとの間に発生する応力歪みやフェライト結晶粒界に析出する銅による粒界歪みのプロセスコントロールが極めて重要となる。一方、ノイズ対策用で使用する積層フェライトビーズでは、厳密なインダクタンス値のコントロールは要求されず、周波数帯におけるQ値コントロールが重要である。なお、積層チップインダクタ、積層フェライトビーズのどちらも導体回路パターンが絶縁性のフェライト磁性体内部に形成されているので、磁束がチップより漏れることのない閉磁路構造であるためカップリングなどの現象を惹起することがないので高密度実装が可能である。

(b) 新フェライト磁石開発技術<sup>13)</sup>

フェライト磁石材料は発明されてから 1990 年代後半までの間に、Ba 系から Sr 系フェライト磁石へと材質移行させてきたが、Sr 系フェライト磁石を上回る磁気特性が見つからなかったために、フェライト磁石の高性能化では Sr 系組成における製造方法的なアプローチが中心的な手段となっていた。即ち、磁気特性を劣化させる原因となる③不完全配向結晶、⑤粗大粒、⑥微細結晶粒、⑦ポイド（空孔）を低減し、均一粒径をした単磁区微結晶を高密度に焼結させることが重要ポイントとなっていた（図 8.20 ～ 8.21）。不完全配向結晶は配向方向に磁化容易軸が揃わず、配向方向の磁化ベクトル成分を小さくしてしまう。粗大粒は結晶粒内に磁壁（磁区の境界領域）が存在し、反対方向に磁界が加わったとき、簡単に磁壁が移動し磁化反転が起こりやすい。微細結晶粒は細くなりすぎ磁性を示さない部分であり、ポイドは空孔で非磁性相となる。そこで、これらの観点からアプローチした開発が NMF-6（日立金属株の商品名）シリーズまでの高性能化であったが、製造技術開発も進み、この材料系（ $\text{Sr}_0.6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）がもつ理論値に近づき、これ以上の高性能化は難しい段階にきてしまった。



図 8.20 結晶組織の模式図<sup>13)</sup>

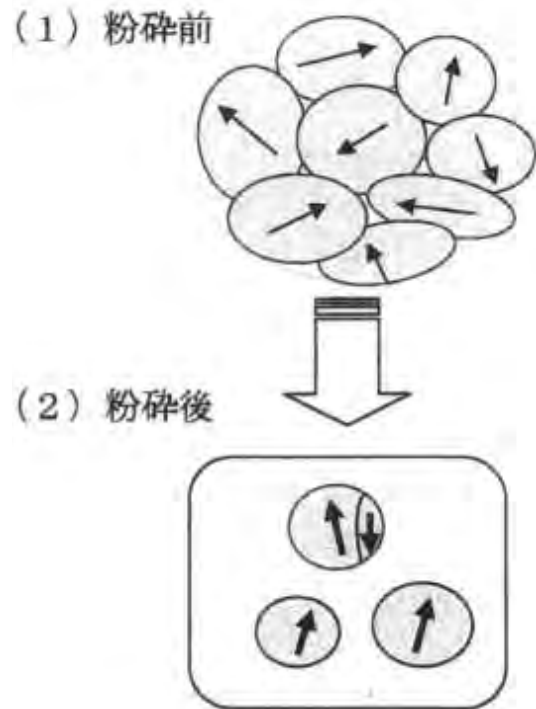


図 8.21 フェライト磁石の磁区構造<sup>14)</sup>

市場要求を背景に組成技術、粉碎技術、微細構造制御技術などを駆使して高性能化が進められた結果、1990 年代半ばにはフェライト磁石の特性は工業ベースにおいてはほぼ飽和してしまった。従来のフェライト磁石の高性能化はいかに特性を Sr フェライトの理論値に近づけるかというものだったからである。

このような中、高磁気特性ポテンシャルを有する La-Zn や La-Co で置換した Sr 系フェライト磁石が開発された<sup>14), 15)</sup>。これは、フェライト磁石がマグネトプランバイト型酸化物の原子配列をしたフェリ磁性体を示すことから、基本組成である  $\text{Sr}^{2+}\text{O}^{2-} \cdot n(\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_3^-)$  における Sr の一部を La で、Fe の一部を Co や Zn で置換した結晶 ( $\text{Sr}_{1-x}^{2+}\text{La}_x^{3+})\text{O}^{2-} \cdot n\{(\text{Fe}_{1-y}^{3+}\text{Me}_y^{2+})_2\text{O}\}$  (Me=Co, Zn) にすることで、結晶の磁気異方性を向上させたものである。図 8.22 は La-Co 系の結晶系を示し、図 8.23、8.24、8.25 は磁気特性を示している。この La-Co 置換型フェライト磁石材料は NMF-9 シリーズとして 1998 年に市場に投入され浸透してきたが、市場からのさらなる高性能化要求もあり、この La-Co 置換型フェライト磁石材料よりも高磁気特性を有する研究を行ってきた。その結果、La-Co 置換型フェライト磁石を凌ぐフェライト磁石材料を開発、2007 年春、量産化することに成功した。この新組成材料は、残留磁束密度 460 (mT)、保持力 366 (kA/m) の磁気特性を有するフェライト磁石で、これまでの NMF-9 シリーズに比較し磁気特性が飛躍的に向上し、



“NMF-12 シリーズ”<sup>16)</sup>と命名された (表 8. 8、図 8. 26)。また、従来材に比較して保磁力の温度係数も小さくでき (図 8. 27)、低温に於ける減磁耐力をも改善することができた。フェライト磁石では保磁力の温度係数が正の値を示すので低温で保磁力が低下し、低温でフェライト磁石に大きな減磁界が加わったとき、磁気特性劣化が起こりモータ出力を低下させるという問題が発生することがある。したがって、保磁力の温度係数を小さくすることができれば、低温度下での保磁力低下を抑制でき、減磁耐力を向上させることができる。

今後、この高磁気特性を有する NMF-12 シリーズは、図 8. 28 のようにモータの小型・軽量化に寄与し、省エネ化の一翼を担っていくものと期待している。<sup>17)</sup>

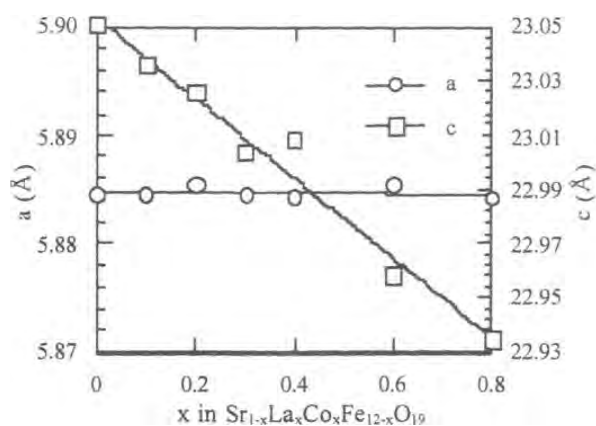


図 8.22  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Co}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  系焼結体における格子定数の組成依存性 (焼結温度  $1200^\circ\text{C}$ )<sup>15)</sup>

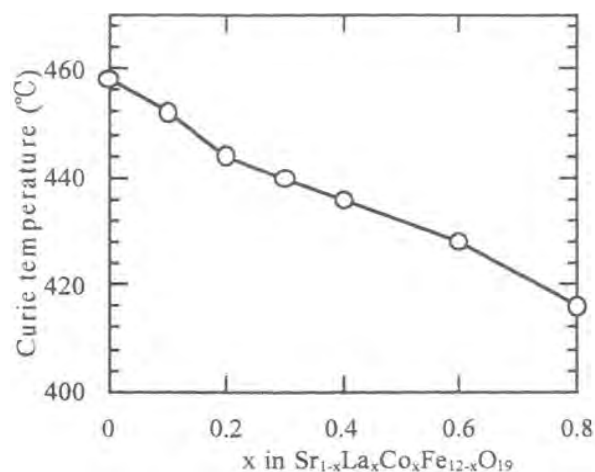


図 8.23  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Co}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  系焼結体におけるキュリー温度の組成依存性 (焼結温度  $1200^\circ\text{C}$ )<sup>15)</sup>

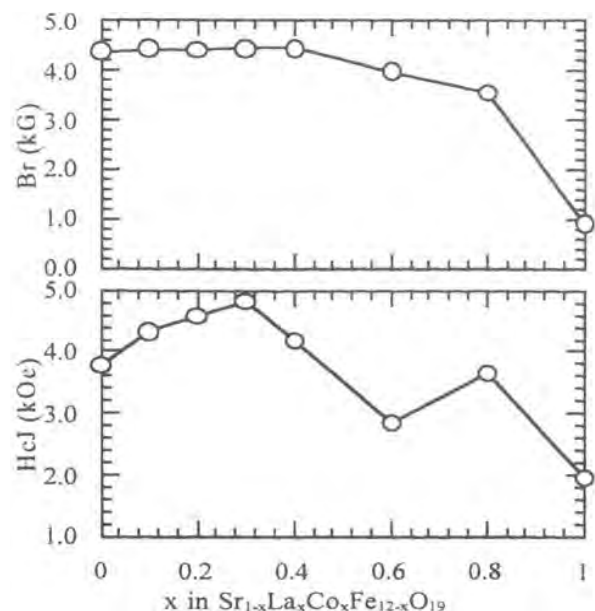


図 8.24  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Co}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  系焼結体における磁気特性の組成依存性 (焼結温度  $1200^\circ\text{C}$ )<sup>15)</sup>

表 8.8 NMF-12 シリーズの磁気特性<sup>16)</sup>

| 材料名     | 磁 気 特 性 |         |                 |         |                 |       |                     |         |
|---------|---------|---------|-----------------|---------|-----------------|-------|---------------------|---------|
|         | 残留磁束密度  |         | 保 磁 力           |         |                 |       | 最大エネルギー積<br>(BH)max |         |
|         | Br      |         | H <sub>cB</sub> |         | H <sub>cJ</sub> |       |                     |         |
|         | (mT)    | (kG)    | (kA/m)          | (kOe)   | (kA/m)          | (kOe) | (kJ/m³)             | (MG·Oe) |
| NMF-12E | 460~480 | 4.6~4.8 | 294~334         | 3.7~4.2 | ≥310            | ≥3.9  | 39.7~43.0           | 5.0~5.4 |
| NMF-12F | 450~470 | 4.5~4.7 | 318~358         | 4.0~4.5 | ≥342            | ≥4.3  | 38.2~41.4           | 4.8~5.2 |
| NMF-12G | 440~460 | 4.4~4.6 | 310~350         | 3.9~4.4 | ≥382            | ≥4.8  | 36.6~39.8           | 4.6~5.0 |

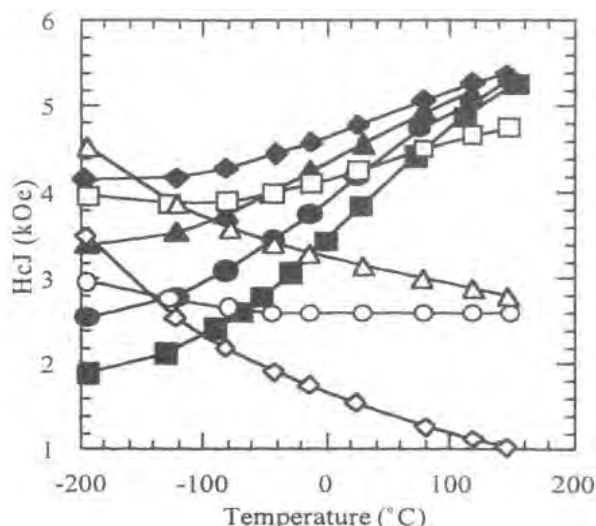


図 8.25  $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Co}_x\text{Fe}_{12-x}\text{O}_{19}$  系結体における抗磁力の組成および温度依存性 (焼結温度  $1200^\circ\text{C}$ )<sup>15)</sup>  
 ■  $x=0$ , ●  $x=0.1$ , ▲  $x=0.2$  ◆  $x=0.3$ , □  $x=0.4$ ,  
 ○  $x=0.6$ , △  $x=0.8$ , ◇  $x=1.0$

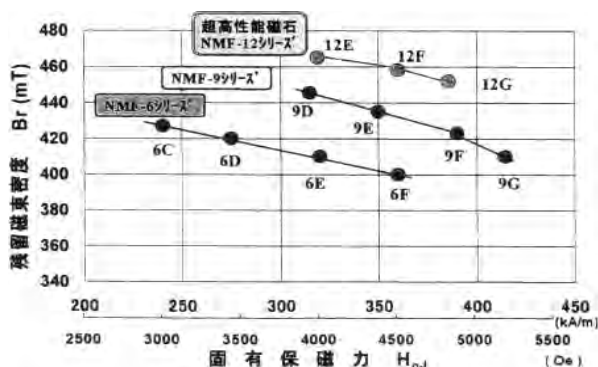


図 8.26 フェライト磁石の磁気特性分布図<sup>16)</sup>

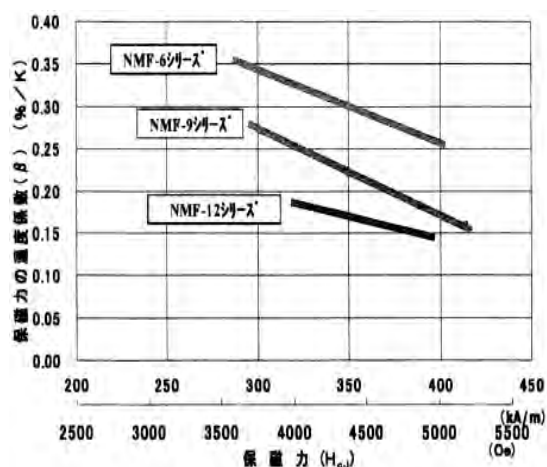


図 8.27 材質別保磁力の温度係数  $(\beta)$ <sup>16)</sup>



|        |      |      |      |
|--------|------|------|------|
| 総磁石重量比 | 1.00 | 0.50 | 0.33 |
| モータ重量比 | 1.00 | 0.70 | 0.58 |

図 8.28 材質別モータ設計例<sup>16)</sup> (2極ブラシ付きモータ)

### (c) 日本の電子部品の国際競争力

電子情報技術産業協会 (JEITA) の調査<sup>18)</sup> では、2006 年の電子部品の日本勢の世界シェアは 図 8.29 に示すように 49% を占めている。主要部品でのトップ企業と世界シェア (推定) を見ると、CCD イメージセンサのソニー (53%)、液晶用偏向フィルムの日東電工 (50%)、低温ポリシリコン液晶のシャープ (40%)、HDD 用ヘッドの TDK (33%)、積層セラミックコンデンサの村田製作所 (30%) などがある。近年では高機能・高密度・低消費電力に対応した機構部品、モジュール部品、高周波部品など複合化部品・製品の成長が顕著である。その代表的企業が、任天堂家庭用ゲーム機「Wii」向け部品の拡大で高収益を上げているミツミ電機である。半導体メモリ、AV 機器などでは、東南アジアの猛烈な追い上げで日本メーカは苦戦を強いられている。

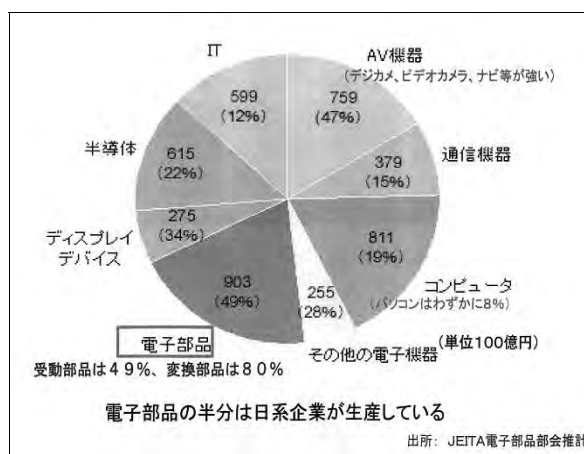


図 8.29 2006 年度電子情報産業の世界生産に占める日系企業の額とシェア<sup>18)</sup>

一方、日本の電子部品メーカー、特に素材型メーカーの国際競争力は群を抜いている。その要因は岡本氏によって指摘された 図 8.30 の歴史的な背景にもあるようにいくつかにまとめられる<sup>19)</sup>。その第一はチタン酸バリウム (BaTiO<sub>3</sub>)、フェライト、人工水晶といった素材技術とその組成制御力があること、第二に、半導体の製造装置と異なり、独自の生産プロセスやノウハウが詰まった製造装置や金型の内製化率が高く、これが技術の社外流出を低め、設備生産性を高めていること。第三に、最先端の AV 機器や電子ゲームなどで世界をリードする企業群が存在し、切磋琢磨する場があることである。

現在の競争力要因をチップコンデンサについて分析したのが 図 8.31 である。誘電体をフェライトに置き換えればチップインダクタでも同様のことが言えよう。

- 主なパッシブ電子部品の材料は日本でスタート
  - ・フェライトの発明(1930)→TDKの創立
  - ・チタン酸バリウムの発見(1944)→村田製作所の発展
  - ・Pd から Ni への内部電極材料コンデンサの実用化で日本勢が先行
  - ・PTCやバリスタなどの材料も日本で開発
- 小型ポータブル機器の出現とそれを支えた小型SMD
  - ・セラミック積層技術による小型高性能部品
- 1970年頃から日本が家庭用電子機器の世界の工場
  - 巨大な市場が出現
  - ・ビデオデッキは1台あたり1500点の部品を使用した
  - ・大量の電子部品の需要→ローコスト、大量生産
  - ・材料から生産設備までのバーチカルインテグレーションの実現
  - 米国は水平分業
- 品質保証に対する考え方
  - ・米国はAQL(Acceptable Quality Level)がベース
  - ・日本は原則不良ゼロ(受け入れ検査省略)
  - ・その結果、現在のパッシブ電子部品の市場不良率はppbレベル
- 早い時期からグローバル展開
  - ・国の支援を受けず、海外生産、営業活動などでグローバル体質となる

図 8.30 日本の電子部品が大きな競争力をもつ歴史的背景<sup>19)</sup>

- 高特化とそれを支える要素技術の強さ
  - ・誘電体積層薄層化競争→小型化、大容量化
  - ・要素技術→素材技術、プロセス技術の融合による“擦り合わせ”の極
- 累積投資とその結果による寡占化で参入障壁大
  - ・開発～営業を含めた総合力
  - ・生産設備投資(部品の種類ごとに固有の設備とノウハウが必要)
- アプリケーションに合った製品開発力
  - ・コンセプトイン、デザインイン(パートナーとしての認知)
  - ・試作設計スピード
- 垂直統合によるブラックボックス化
  - ・材料開発、プロセス開発
  - ・高精度、高生産性設備の自社開発

図 8.31 現在の競争力要因 (チップコンデンサの例)<sup>19)</sup>

日本の電子部品は上記のように国際的にも優位にある、とはいえ、電子部品業界も再編の足音が聞こえてくる。モータの大手の日本電産は国内外で 27 件の M&A を手掛け、京セラ、TDK、村田製作所も潤沢な資金力で、外延的な成長戦略を強めている。そこに

資金力のある投資ファンドや東南アジアの部品メーカーも食指を動かし始めている。日本の電子部品業界は特長のある技術、経営で高収益を誇る中堅企業も数多い。電子部品業界は産業としても、投資対象としても宝の山と言っても過言ではなかろう。すなわち、積層チップインダクタでもまず第一に重要なのは高特化とそれを支える要素技術の強さである。日本が得意とする素材技術ではコストの安い Ag を内部電極に使用するために 900℃ 以下の焼成が可能な Ni-Zn-Cu 系フェライトを開発している。また、積層化プロセスでは薄層シート化技術やビアホール作成のためのレーザ加工技術など他の国がマネのできないプロセス技術が随所に展開されているのである。これらプロセス技術は日本企業が自社開発しているので、そのノウハウは公開されていないが、例えば 0402 (0.4mm × 0.2mm) の素子をつくる生産技術などは他国の追従を許さないものである。また、かような極超小型の素子を扱うハンドリング技術も無視できないものである。最近のデジタル TV の薄型化には部品メーカーの協力なしには進まないことは周知の事実である。

上記のように日本の電子部品業界は順調に発展しているが、今後他国とどのように差別化していくかが問題となる。そこでまず最初に、特に強調しておきたいのは“マネのできない技術で追従を許さない”ことであろう。積層チップコンデンサやチップインダクタに見られるような材料プロセス技術の融合による“超”と呼ばれる高機能化、小形化、薄型化による技術の差別化は今後も必要であろう。また、環境エネルギー問題に対応して各種の課題も生じてくる。まず最初にビジネス環境の変化を考えてみよう。現在世界中にデジタル化が進んでいる。これによりビジネス参入の障壁が低くなり、いろいろな商品のコモディティ化の速度が速くなってきている。資源のない日本にとって資源問題は重大な問題である。資源の豊富な中国や BRICS の追い上げも無視できないであろう。そのような状況下で、利益の源泉はどこに求めるかが大きな課題となる。日本の電子部品産業が世界で勝ち残るには技術力はもちろんのこと経営手腕も問われることになる。

## 8.3 フェライトの誕生から実用化への道のり

### 8-3-1 フィリップス社との特許係争<sup>20)</sup>

フェライト産業の発展を知る上で無視できない問題にフィリップス社との特許係争問題がある。フィリップス社との特許係争の概要は岡本氏によりまとめられ



ており、図 8.32 に示したとおりであるが TDK の社史<sup>21)</sup>に従って、少し詳しく述べてみよう。

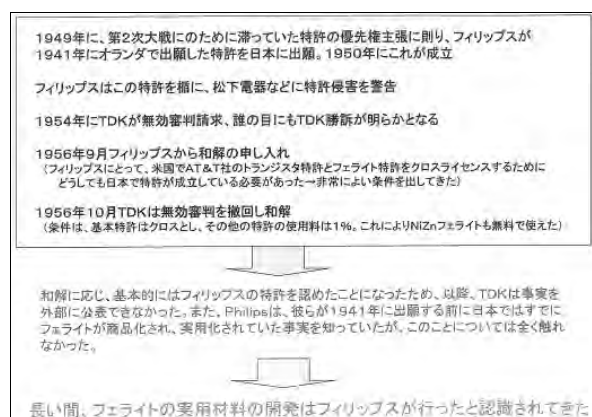


図 8.32 フィリップス社との特許係争の概要<sup>20)</sup>

### ① フィリップス社の特許が成立

1941年(昭和16年)10月24日、オランダのフィリップス社は、「酸素含有量を保有することを特長とする、高周波に対して磁気損失の少ない磁鉄心材料」、すなわちフェライトに関する基本特許をオランダ政府に出願した。

第二次世界大戦終了後日本を占領したGHQが採った政策の一つに、1949年8月に公布された「連合国人工業所有権戦後措置令」がある。これは、本来ならば日本に出願できた連合国の特許が、交戦状態のため出願できなかったのもので、それを救済するための措置として出されたもので、具体的には、連合国については自国で出願後10年以内であれば、その特許を日本にも出願できるという内容だった。

フィリップス社はこの措置によって、フェライトの基本特許を1949年11月17日に日本に出願した。この特許の請求範囲は広く、たとえ製造方法が違っても、製品化された場合はその特許に抵触するというもので、この特許が成立すると、TDKも既存の技術や製造方法で類似品をつくることができなくなり、TDKにとっては誠に重大な内容の特許だった。この特許は、翌年9月27日付け日本特許第184830号として登録された。

フィリップス社はこの特許の成立後、1952年から1954年にかけて、磁性材料の改良や製造方法等に関する関連特許を十数件出願した。1954年1月26日付で特許出願公告になった、フィリップス社の磁性材料の改良に関する特許がたまたま公開された。また時を同じくして、住友金属工業株式会社が、金属氧化物磁性材料の製造技術をフィリップス社から導入するというニュースが報道された。これらの出来事によってTDKは初めて、フィリップス社の特許に関する一連

の動きを知った。住友金属工業の子会社であった住友特殊金属がフィリップス社から技術導入した経緯は社史<sup>22)</sup>に詳しいのでそれを参照されたい。

やがてフィリップス社は、ようやく生産が始まってきたわが国のテレビ業界に対して、機先を制するような通告をよこしてきた。同社からの通告は平たく言えば、「フェライトの基本特許はフィリップス社がもっている。だからフィリップス社とフェライトの特許を契約しないとフェライトを使用したテレビは製造できない。フェライトの契約も行い、フィリップス社からテレビ製造技術を導入したらどうか」という、半ば脅しに満ちた内容だった。RCA社からテレビ受像機製造の技術を導入し、TDKからフェライトの供給を受けてテレビを生産していた日本のテレビメーカーにとって、この通告はまさに青天の霹靂とも言うべきものだった。TDKからフェライトを購入していたテレビメーカーは、TDKにフェライトの特許保証を求めてきた。TDKは、フィリップス社の特許を認めて技術を導入するか、同特許は無効であるとして対決するかの重大な決断を迫られた。

### ② 無効審判を請求

フェライトは加藤・武井両博士による日本の発明品として特許が成立しており、TDKはその特許に基づいて製造・販売をしている。したがってフィリップス社が日本で出願した特許は無効であると判断し、1954年(昭和29年)7月8日、特許庁に審判請求を行った。

反証の論旨は次のようになる。第一に、TDKは1936年4月頃から金属氧化物磁性材料の研究を始め、1938年11月25日に、加藤・武井両博士と特許の実施契約を結びフェライトの生産と販売を行ってきたこと。第二は、フィリップス社が1941年10月24日にオランダで特許を出願したときは、その技術的内容は公になっていたこと。その証拠に、1940年10月23日にフィリップス自身がTDKに対してフェライトコアの引合いを出し、TDKは12月に6種類95個のサンプルを輸出したこと(図8.33参照)<sup>23)</sup>。しかもフィリップス社が出願したフェライトコアの特性は、TDKがサンプル輸出したコアの特性と全く同じであること。第三は、フィリップス社が日本で特許を出願した当時、すでにこの磁性材料は発売されていたこと、である。2年3か月に及ぶ激しい論戦の結果、TDKの主張が通った形で結審する見通しが濃厚となった。

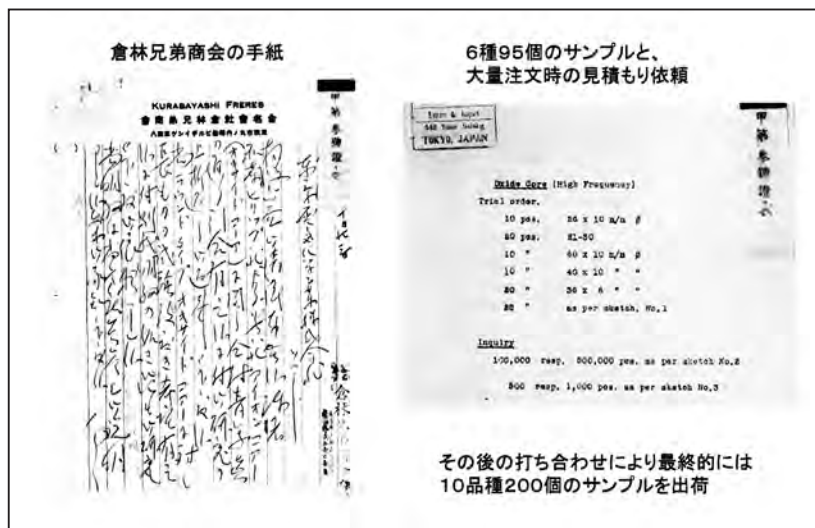


図 8.33 1940 年フィリップス社からのサンプル要求の証拠書類<sup>20)</sup>

### ③ 和解

1956 年(昭和 31 年) 9 月 11 日にフィリップス社は、日本電子開発株式会社の谷村博蔵社長（後に松下電器産業(株)副社長）を仲介役に立てて、TDK が特許庁に対して請求している特許無効審判を取り下げることを条件に、和解を申し入れてきた。

TDK は慎重に検討した結果、次の 4 点を条件として和解することとした。第一は、論争の対象となったフィリップス社の特許は、TDK 所有の特許とクロスライセンスとすること。第二は、同社が所有するその他の特許については、TDK に対する許諾実施料は 1 % とすること。第三は、TDK の製品輸出は自由とし、数量、地域は無制限とすること。第四は、この仲介斡旋について、TDK は村上義一か渋沢敬三を選任する、ということだった。交渉は予想以上の困難と時間を要したが、フィリップス社から和解の申し入れがあったから 1 年半を経て、1958 年 3 月 14 日に和解が成立した。

TDK にとって有利のうちに結審の見込みが強かったにもかかわらず和解の道を選んだのは、フィリップス社が多数出願している特許ごとに無効審判請求を行った場合の費用と労力を考慮したこと、テレビメーカーから TDK に対して寄せられている特許保証をどう獲得するか、また、フィリップス社が保有するフェライトに関する技術をどう有利に利用するかといったことだった。このような点を考慮した上での決断だったとはいえ、和解を選択するということは、フェライトがフィリップス社の発明であることを認め、同社が周辺特許として保有した技術を評価せざるを得なかったということであり、苦渋に満ちた決断だった。

### 8-3-2 フェライトの生産、販売

戦前におけるフェライトの実用化の歴史は岡本氏<sup>24)</sup>によって整理されており 図 8.34 に見ることができる

が、1937 年に TDK の蒲田工場での量産が始まり、オキサイドコアの商標で営業活動が開始された。カタログに見る製品群は

図 8.35 のような広がりを見せた。戦前での需要は軍関係が多かったが、民間では安立電気に納入された無線機用フェライトとナショナル並 4 ラジオ用フェライトロッド（図 8.36 参照）などがある。ここでは戦前におけるフェライト実用化への苦悩の道のりを再び TDK の社史<sup>25)</sup>によって追ってみる。

|         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| 1930    | 加藤・武井両博士が東工大においてフェライト発明(1932年に日本特許登録) |
| 1935/12 | フェライト事業化のために東京電気化学工業創立                |
| 1937/7  | 蒲田工場竣工(7月21日) 量産開始。オキサイドコアの商標で営業活動開始  |
| 1937    | 安立電気に納入され無線機に使用された(世界初)               |
| 1938/7  | 海軍技術研究所でオキサイドコアの高周波特性報告書発行            |
| 1938    | TDK製造のポータブルラジオにフェライトコアのイダクタ使用         |
| 1939/5  | 海軍技術研究所が船舶用無線(潜水艦用)にフェライトを採用          |
| 1939/12 | ナショナル並4ラジオ用にフェライトロッドを採用(10万本出荷)       |
| 1940/12 | オランダのフィリップス社にフェライトコアサンプルを輸出           |
| 1941/1  | 海軍航空機無線用にフェライト採用                      |
| 1941/6  | 陸軍車両用無線、戦車無線にフェライト採用                  |
| 1941/10 | フィリップスがオランダでフェライト特許出願                 |
| 1943/5  | 蒲田工場と平沢工場が海軍監督工場に指定される                |
| 1944/4  | 航空機の無線方位測定器用アンテナに採用                   |
| 1946    | PhilipsがNIフェライトの特許出願とPermalloyの商標化    |

図 8.34 戦前におけるフェライト実用化の歴史<sup>24)</sup>

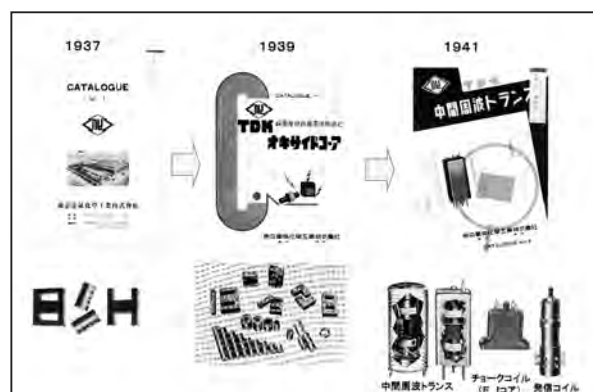


図 8.35 カタログに見る製品群の広がり<sup>24)</sup>

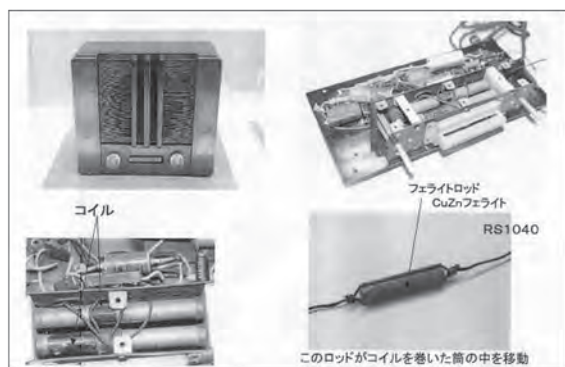


図 8.36 松下電器製ムー同調ラジオ（1940 年製）受信機（R-4M 型）<sup>24)</sup>

### ① フェライトをつくる

1937 年(昭和 12 年)7 月 21 日、機械工場 594 平方メートル(180 坪)、粉碎室、研究室、硝酸処理室が各 66 平方メートル(20 坪)、事務室その他 264 平方メートル(80 坪)をもった蒲田工場が完成した。フェライトコアをオキサイドコアと名づけ、8 月から営業活動も兼ねて試作を開始した。

フェライトコアの製造は、原料となる酸化鉄と酸化銅をつくることから始めなければならなかったが、この作業が実に大変な仕事だった。酸化鉄は、電解鉄を硝酸に溶かしてつくった。カマスに入って納入された電解鉄を水洗いしてゴミを除いた後、口径 40 センチ高さ 80 センチくらいの瓶に 3 分の 1 ほど入れる。これに硝酸を加えると強い反応を起こし、熱と猛烈な異臭を放つガスを発生しながら電解鉄が溶けスラリー状になる。これを放置しておくで瓶の底に沈殿するので、ガスコンロで加熱しては 30 分ごとに木製の棒で攪拌する。ガスが出なくなるまで硝酸をガラス製のサイフォンで継ぎ足してはこの作業を繰り返す。排気装置が設けられてはいたが、ガスはよく室内にこもった。マスクを着けて作業をするが、布製のマスクでほとんど効果はなかった。天気の良い日は窓を開けて仕事をしたが、雨の日は窓を開けることができず、作業者は仕事の途中で外に飛び出して大きく深呼吸をしては仕事を続けた。6 時間ほどたつと溶解が終り、瓶にスラリーが溜まる。その後このスラリーを、煉瓦造りの釜に付けた鉄製の乾燥鍋に汲み移し、ほぼ一日かけてガスで加熱乾燥させる。これを鍋からかき取り、外径、高さとも 40 センチくらいの鉄製のボールミルに入れ、乾式粉碎して酸化鉄ができあがる。酸化銅の製法も酸化鉄をつくるのと同様で、作業は並行して行われた。電解銅は幅 30 センチ、長さ 100 センチ、厚さ 2 センチくらいの板状で、これをそのまま瓶に入れて硫酸で溶解した。

このようにしてつくった酸化鉄と酸化銅に市販品の酸化亜鉛を秤量配合し、数種の試料をつくる。配合比を違えた鶏卵の黄身ぐらいの量の材料をそれぞれに瀬戸製の乳鉢で混合し、内側が三つ割りになった二重円筒形の金型に押し込み、ハンマーで叩いて材料を圧縮し、この作業を何度か繰り返した後最後に油圧プレスで直径 1 センチ長さ 5 センチの丸棒に成型し焼成する。その試料をコイルに通して特性を測り良品か否かを判定する。良品があればその材料の配合比に従って配合し、本格生産する。ボールミルで混合した材料を、直径 7 センチ厚さ 3 センチくらいの円板状に成型し、800 度～850 度で仮焼する。仮焼き用の炉は、直径約 14 センチ長さ約 70 センチの素焼きの筒にニクロム線を巻いた手作りの炉で、半円形のフネに成型品を乗せ、約 12 時間焼成して自然冷却する。トランスは高価で購入できなかったで、焼成温度の調節は、塩水を入れた容器の中で亜鉛電極板どうしの距離を変えることで電流を調整して行った。

仮焼成が終ると、材料を鉄製の乳鉢に入れ 700 グラムの重さの鉄製の棒で数ミリの粒になるまで粉碎する。この作業は女子がいったが、女性の腕にとってはなかなかの重労働だった。粉碎された材料はその後ボールミルで微粉碎する。回転中にボールミルの内壁に材料が付着するのを防ぐため、1 時間ごとにハンマーで叩く。ほぼ 1 昼夜でフェライト材料が完成する。外径、高さとも約 40 センチのボールミルで約 5 キログラムの材料ができた。

このようにしてつくった材料を、水をバインダーとして使い油圧プレスで成型し、これを約 1,200 度で焼成しフェライトコアをつくった。その後仕上げとして鉄板の上にカーボン粉末を敷いてコア断面を削って寸法調整を行うが、作業性は悪く歩留まりは 60% くらいと低かった。

当時の製品はほとんどが小型の丸棒だった。金型のない丸棒製品は、角板成型品の角を削ってつくった。試作品として L 形、E 形、U 形コアをつくる場合は、仮焼成した円板状を金鋸の歯をつぶしてつくったナイフで削り、その後本焼成

した。しかし欠けや変形が多く苦労した。

### ② フェライトコアを売る

コアの試作ができて、測定器も十分な性能をもったものがなく、フェライトとしてどのような特性を測定してよいかわからなかった。そこで試作品を、五反田(東京)にある電気試験所で検査してもらったところ、十分に製品として使用できるということがわかり、オキサイドコアと名づけて本格的な営業活動を始



めた。『純国産特許高周波磁心 TDK オキサイドコア』という見出しでカタログをつくり、全国の通信機メーカーやラジオメーカーに郵送した。

通信機器には、ドイツから輸入したダストコアが磁心として使われていたが、その代わりに使えるのではないかと考えて、通信機器メーカー向けに営業活動を行った。当時通信機器メーカーは、日本無線電信電話（現・日本無線）、日本電気、安立電気（現・アンリツ）、東京芝浦電気（現・東芝）、国際電気通信など 30 社ほどが、主に船舶無線機を製造していた。これらの各社に、オキサイドコアとはいかなるものかを理解してもらうことから始めて、その使い方や利点を説明するために日参した。そのような中で、安立電気株式会社が無線機用として初めてオキサイドコアを採用した。また、カタログ郵送の反響としては、大阪の同盟通信社から引合いを受け注文を得た。同盟通信社は自社で通信機をつくっており、日本でも磁心をつくる会社ができただけで大変驚いた。しかし他のメーカーでの採用は遅延として進まず、創立 2～3 年目のユーザは、この 2 社だけだった。

営業初年度（1937 年）の売上は個数にして 372 個。DR（ドラム）型 106 個、R（丸棒）型 90 個、EI 型が 65 個で、ほとんどは安立電気（株）へ販売したものだ。平均単価 3 円 50 銭。年間売上金額にして 1,297 円 50 銭は、1 か月分の人件費も賄えない額だった。生産が 10 倍以上となり 1 万 4,952 円を売り上げた翌年でも、社員約 30 名の年間人件費を満たすには至らなかった。

なお、TDK のフェライト出荷数量の推移は 図 8.37 のとおりで、戦前の 1945 年迄に 500 万個を生産している。

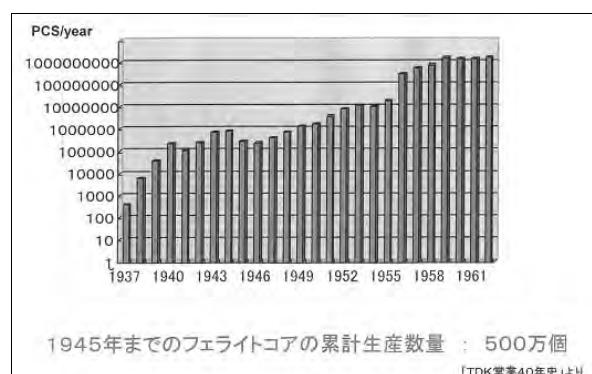


図 8.37 TDK のフェライト出荷数の推移 <sup>24)</sup>

### ③ 松下電器からの受注

無線機器におけるフェライトコアの採用は思うようには伸びなかったし、また、すぐに需要が大きく成長

することも期待できなかった。そこで TDK はフェライトの新たな需要先として、当時成長しつつあったラジオに目標を定めて営業活動を開始した。当時ラジオは、バリコンを使った同調方式を採用していたが、バリコン方式の代わりに、コイルの中をフェライトコアを動かして周波数を同調させる  $\mu$  同調方式に替えてもらえばフェライトが使われるのではないかと考えたわけである。

ラジオメーカーは、東京には山中電機、ミタカ電機、原口無線等 5 社あり、関西には早川金属工業（現・シャープ）、大阪変圧器（現・ダイヘン）、松下電器産業等の 5 社があった。松下電器産業株式会社は最後発メーカーだったので、何か製品としての特長を出そうとしていたところであり、TDK は松下電器産業（株）に積極的なアプローチを続けた。

1940 年（昭和 15 年）5 月、松下電器産業（株）への売り込みがようやく成功し、丸棒形コア（直径 10 ミリ、長さ 40 ミリ）を約 10 万個受注した。前年の年間総生産数量が 3 万 7,000 個であるのと比較すれば、この注文がいかに大きなものであったかがわかる。松下電器産業（株）が採用したのに引き続き、12 月にはミタカ電機株式会社がフェライトを高周波コイルに使用することが決まった。同社は、主に朝鮮（当時の国名）に製品を出していた。この地域は山岳が多く、より高感度が要求されることからフェライトを採用することにしたものである。これらラジオ分野への売り込みが成功することによって、ようやく TDK は経営の目処がついてきた。この年の売上は、前年に比べ 3 倍近い 14 万 4,000 円弱を計上した。

### 8-3-3 戦後におけるフェライト産業の発展

戦後におけるフェライト産業の発展は 図 8.1 のソフトフェライトの生産金額の推移に見られるように目ざましいものがあるが、再度 TDK の社史 <sup>26)</sup> によって 10 年単位でその進展を追ってみよう。

① フェライト工業化の手がかりを確保（1947～1956 年）

1947 年（昭和 22 年）10 月、GHQ（連合国総司令部）は、従来使用されていた並 4 式ラジオの製造を中止してスーパーヘテロダイン方式に切り替えよとの指令を出した。それは TDK にとっては、まさに朗報だった。なぜなら同方式のラジオには IFT が使用され、この IFT にはフェライトコアが使われるからである。GHQ 指令とともに、TDK には全国のセットメーカーから注文が殺到し、フェライトは売り手市場となった。

1949 年と続く 1950 年は、営業成績はラジオ用コア

の旺盛な需要を背景に順調に推移していたが、わが国経済はデフレ政策、いわゆるドッジ旋風のおおりにともに受けて金融不況が訪れた。ラジオの売上は減少し、取引先の支払い条件も悪化した。しかしフェライト自体の需要は安定しており、危機感はさほど切迫したものではなかった。国内ラジオメーカが軒並み青息吐息の中で、1948年のTDKのコアの生産量が約71万個だったのに対し、1949年には131万個以上とほぼ倍増した。これはアマチュアのラジオ自作ブームに乗って、部品、コイルメーカが新たに取り先になったからだった。1949年のコアの販売比率は、セットメーカ4に対して部品メーカが6となっていた。

1950年6月に発生した朝鮮戦争を契機に、わが国の産業は本格的に成長を始めた。1951年9月にラジオの民間放送が開始され、ラジオが急速に普及し始めた。そのためフェライトの受注はさらに伸びた。中間周波トランス、高周波用コア、そして新たに登場したポータブルラジオのアンテナ用コアなど、フェライトコアの用途はさらに広がっていった。

1952年に日本電信電話公社が設立され、通信機の市場は新たな局面を迎えた。またポータブルラジオが市場に登場し、これが新たな需要をつくりだした。10月には三洋電機(株)製のポータブルラジオにTDKのフェライトアンテナが採用されるなど、売上は1951年に比べて倍増した。

1953年になるとラジオ市場は一段と活況を呈した。ラジオは据え置き型に変わってポータブル型が一般家庭に急速に普及した。また、新しいマスメディアとしてテレビが登場してきた。白黒テレビは、冷蔵庫、洗濯機と並んで「三種の神器」として消費者の憧れの的となった。テレビはこの年の8月から民間放送が相次いで始まったが、TDKは1951年3月にはテレビ用コアの製品化に成功していた。先の需要に対応して、フェライト素材を生かし、新製品をつくりだす開発活動と営業活動が相まって、テレビ増産の波に乗って売上が急速に伸ばすことができた。

創業以来、フェライトコアは実質的にTDKの独占市場であり、独占企業としての利益と苦労を味わってきた。しかし1955年東北金属工業(株)(現・トーキン(株))と東京通信工業(株)(現・ソニー(株))が通信機市場に焦点を当ててフェライト事業を開始した。TDKにとって新たなフェライトの競合社が出現した。この年の営業成績は、前半は不振だったが後半に入りポータブルラジオの売れ行きが急増し、前半の不振を一掃できた。

1955年9月、電電公社から搬送電話用にフェライトコアを初めて2,000組受注した。

## ② エレクトロニクス市場拡大期 (1956 ~ 1966 年)

1956年(昭和31年)は、「エレクトロニクス元年」すなわち電気工業から電子工業への転換期の幕開けと言える。1959年4月の皇太子ご成婚、1964年の東京オリンピックなど全国民の耳目を集める出来事が続き、テレビ、トランジスタラジオを中心とした家庭電化ブームが到来した。

当時のフェライトコアの三大用途は、テレビ、ラジオ、通信機である。TDKはこのような環境や市場の動きに対応し、新工場の相次ぐ建設、増産、中央研究所の新設、製品群の拡大、事業部制組織の採用、輸出の拡大など、積極的な事業拡大を図り、企業基盤を大きく広げたときだった。

フェライトについても開発が進み、通信機用コアは1960年3月にH5A材、1961年10月にH6B材が相次いで開発された。どちらも他に類を見ない高性能を有しており、通信機分野への参入が可能となった。フェライト磁石は1960年7月の発売以来、テレビ偏向補正用、小型モータ、電気時計用など新しい市場を次々に開拓して業績を伸ばしてきた。またパラメトロン、メモリーコア、メモリーマトリックスなどのコンピュータ関連製品も、1960年代半ば頃から本格化してきたわが国電算機メーカの勃興と歩調を合わせ、電算機用記憶装置関係、自動制御装置、小型会計機用演算装置などを主製品に数々の新製品が販売された。

## ③ 激動のエレクトロニクス産業 (1967 ~ 1976 年)

この時期は電子工業界を取り巻く環境が激しく変化し、それに対応してTDKの動きも極めてダイナミックに変化した。わが国の経済は成長を続け、エレクトロニクス市場は民生用、産業機器用両市場とも裾野が広がった。日本の家電製品は低価格を武器に、アメリカ市場を中心に輸出が大幅に伸びた。その結果貿易摩擦が生じ、1971年(昭和46年)8月のいわゆるニクソンショックによって為替レートが切り上がり、経済活動は混乱の度合いを高めた。また1973年には石油ショックが全世界を襲い、わが国の産業と経済界は大きな打撃を受けた。

フェライトコアとセラミックコンデンサは、1960年代半ばは、カラーテレビの対米輸出と白黒テレビとラジオの国内需要を背景に順調に推移した。また急速に生産が伸びたカラーテレビ向け新製品が売上に貢献した。1969年はカラーテレビの生産は最盛期を迎えた。セットメーカの増産の波に乗り、フェライトコアの売上高は1965年から1970年までの期間で約3倍に成長し、コンデンサも1969年には8か月連続売上新記録を達成するという活況を呈した。また、企業への

電子計算機の導入が本格的に進み始め、設置台数は1966年には2,000台を突破した。情報化社会の誕生を背景に、パラメトロン式電子計算機とコアメモリーを使用した記憶装置に加えて、電算機用磁気ヘッドという大型製品をこの市場に投入した。

フェライト磁石は、鑄造磁石に比べて多様な形状が容易に製造でき、しかも価格が安い。そのため従来の市場に加えてスピーカ、チャックなど用途が拡大し、特にスピーカ用磁石は1968年頃から急激に成長した。高級ステレオは、1台で多数のスピーカを使うため需要が増えたもので、フェライト磁石はアルニコ磁石にとって代わった。

#### ④ エレクトロニクス市場の多様化(1977～1988年)

この期間は、製品の軽薄短小が一層進み、それに対応するために部品のチップ化が求められるようになった。このニーズに対応するべく、TDKは面実装部品と実装機械の両面からアプローチを図る、トータルSMTという考えで対応を進めた。

一例をあげれば、1980年1月には巻線型リードレスコイルを発売するなどチップ部品の拡販を急ぎ、新市場の占有を狙った。またこれらに先立つ1979年10月、チップ部品自動装着機アビマウントを発売した。

#### ⑤ 不況下のエレクトロニクス産業(1989～1998年)

世界的規模で政治、社会、経済、産業の構造が大きく変動し、それらが直接的に企業活動に影響を与える時代に入った。さしもの好景気もバブルがはじけた後は不況に転じ、もはやかつてのような高度成長が期待できなくなった。その結果、つくれば売れるという時代は終り、市場のニーズをきめ細かくつかんだ商品でないと売れない時代になってきた。

一方、円高傾向はますます進行し、ついには1ドルが80円台の時代に突入した。国内の空洞化が深刻化する中で、企業の海外シフトは好むと好まざるとにかかわらず進み、海外生産はますます大きくなっている。これまでTDKの高収益を支えてきたフェライトや磁気テープは成熟製品となり、もはやかつての高収益商品ではなくなった。

#### 〈参考文献〉

- 1) JEITA 電子部品部：JEITA Rev. Vol. 566P1 (2008 No. 6)
- 2) 日本ファインセラミックス協会：“2008年ファインセラミックス産業動向調査” 日本ファインセラミックス協会 P26 (2008)
- 3) 増澤清幸：セラミックス Vol. 42 P798 (2007)
- 4) 日本電子材料工業会フェライト部会：“ソフトフェ

ライト中国調査報告 (2002)

- 5) 一ノ瀬昇、日口章 編著：“磁石材料の新展開” 工業調査会 P154 (1988)
- 6) 日本ボンド磁性材料協会：BM News Vol. 37 P145 (2007)
- 7) 同上 P74 (2006)
- 8) 日本電子材料工業会マグネット部会：“マグネット中国調査報告書” (2000)
- 9) 日本ボンド磁性材料協会：BM News Vol. 37 P144 (2007)
- 10) 同上 Vol. 36 P152 (2006)
- 11) 一ノ瀬昇、山本孝 編著：“積層セラミックス技術のすべて” 日刊工業新聞社 (2008)
- 12) 日本セラミックス協会編：“セラミックスの電磁氣的・光学的性質” 日本セラミックス協会 P79 (2006)
- 13) 長谷川統久：FC レポート Vol. 26 P83 (2008)
- 14) 田口仁、武石卓、諏訪建一郎：日本応用磁気学会誌 Vol. 21 P901 (1997)
- 15) Y. Ogata, Y. Kubota, T. Tamaki, M. Tokunaga and T. Shinohara：IEEE Trans. Mag. Vol. 35 P3334 (1999)
- 16) 日立金属製品紹介：日立金属技報 Vol. 24 P66 (2008)
- 17) 日立金属エレクトロニクス材料・部品カタログ P22 (2008)
- 18) 電子情報技術産業協会：電子部品部会推計 (2007)
- 19) 岡本明：フルラス・岡崎記念会；フルラス賞 30周年記念講演会予稿集 P4 (2008)
- 20) 同上予稿集 P51 (2008)
- 21) TDK 編：“TDK60年史” P60 (1995)
- 22) 住友特殊金属 編：住友特殊金属三十年史 P29 (1995)
- 23) 文献 19) P55 (2008)
- 24) 文献 19) P51-53 (2008)
- 25) 文献 21) P129 (1995)
- 26) 文献 21) P200 (1995)



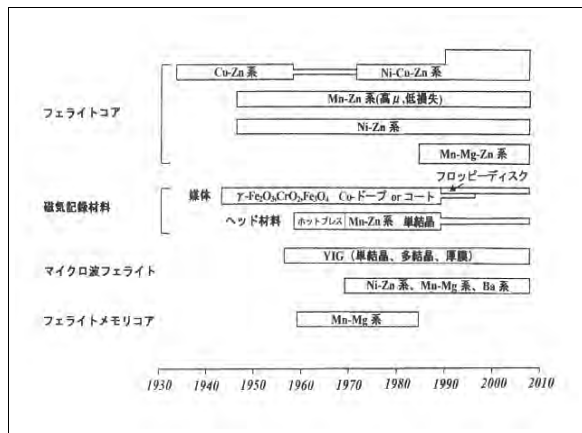
## 9 フェライト技術の系統化

フェライトが工業化されてから約 75 年が経過した。よく知られているように、1950 年から 1980 年迄の 30 年間はフェライトの学問と工業が世界各国で飛躍的に発展したフェライトの黄金時代であった。今もフェライトの生産は 図 8.1、8.3 に見られるようにそこそこの生産は行われているが、生産量では、中国、韓国、インドなどに追い抜かれつつある。ここではフェライト技術を系統化し、フェライト産業の今後の発展を期待したい。

## 9.1 ソフトフェライト技術の系統化

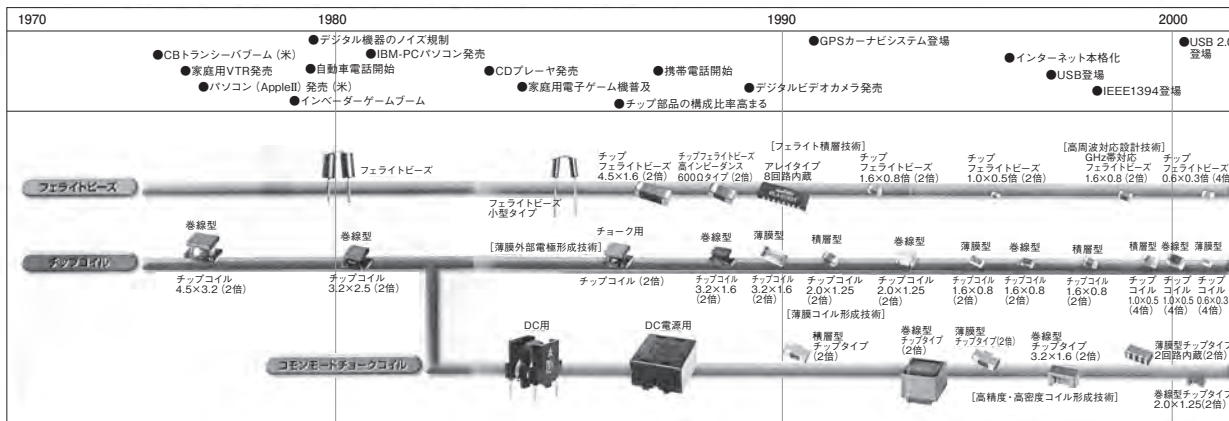
日本のソフトフェライトの系統化は杉本氏<sup>1)</sup>のフェライトの歴史を基にして作成すると図9.1のようになる。戦前のCu-Znフェライトから戦後はMn-ZnおよびNi-Znに変遷している。そして、フェライトの生産量は1951年に開始した民間放送に伴うスーパーヘテロダイン方式のラジオ受信機の普及、1953年からの白黒TVの放送開始、それに続くカラーTVの普及などによって急速に増加していった。日本の伝統的なソフトフェライトであるCu-Zn系フェライトは1970年頃には工業的な生産が中止され、これに代わって低温焼結が可能なNi-Cu-Zn系フェライトが登場する。この系のフェライトは1000°C以下での焼結が可能であり、銀電極との積層化が可能なことから図9.2の積層インダクタに使用されている<sup>1)</sup>。この積層化部品は日本以外の国ではマネのできない材料およびプロセス技術を活用しており、世界のシェアを独占している。TVの薄型化や携帯電話の普及に伴い積層インダクタのニ-

ズは高まるばかりであり今後の進展が期待できる。

図 9.1 ソフトフェライト技術の系統化<sup>1)</sup>

TV や搬送電話用コアが主な用途であった Mn-Zn 系フェライトも 1975 年頃からスイッチングトランスに用いられるようになり、特性改善への努力が続けられている。図 9.3 に Mn-Zn 系フェライトの初透磁率  $\mu_i$  の驚異的な改善の経過を示した。この技術改善にはセラミックス特有の微量添加物の効果が効いている。1961 年に Akashi ら<sup>3)</sup>による微量の  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  添加により、世界で最も低損失の Mn-Zn 系フェライトが登場したのである。その後多くの研究者らにより初透磁率  $\mu_i$  の改善は進められ、Shichijo et al.<sup>4)</sup>らによる真空焼結により  $\mu_i$  は 20,000 を超えるようになった。

## デジタル情報機器の進化を支えるノイズ対策部品

図 9.2 積層インダクタ部品の変遷<sup>2)</sup>

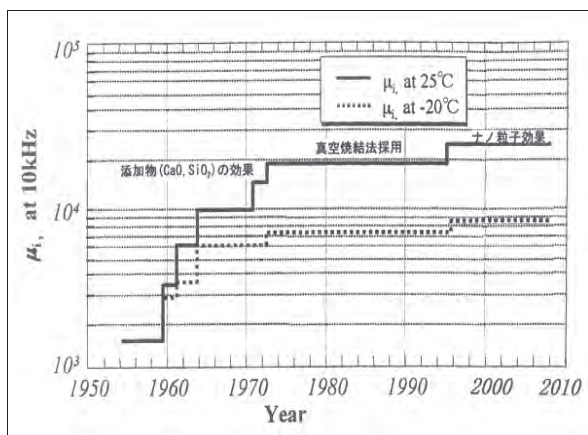


図 9.3 Mn-Zn系フェライトの初透磁率 $\mu_i$ の変遷<sup>1)</sup>

日本では、短波およびマイクロ波用のフェライトとして、戦前はMg系フェライトが商品化されていたが、戦後YIGやフェロックスプレーナが開発されると、これらが主流となった。YIGは損失が小さいことからマイクロ波デバイスに多用されている。単結晶や薄膜も用いられている。現在は携帯機器用のSAWフィルタなどが主力製品である。

磁気記録材料の栄枯盛衰は劇的という他はない。日本が世界に誇りうる高度な技術の結晶として栄華を極めた磁気記録産業は後発の光磁気記録にあっていう間に置き換わっていった。磁気ヘッド材料にもフェライトが当初は使用され、Ni-Zn系ホットプレスフェライトやMn-Zn系単結晶が多用されたが、権動ノイズの問題が解決されぬまま使用されなくなった。

メモリコアとしてのMn-Mg系フェライトも一時はコンピュータの主役であったが、半導体メモリの台頭によってフェライトメモリは駆逐され、1985年頃には姿を消してしまった。磁気バブルデバイスの開発も多くの研究所で試みられたが、実用化迄には至らなかった。

## 9.2 ハードフェライト技術の系統化

ハードフェライトの系統化を日本電子材料工業会の資料<sup>5)</sup>をベースに示せば図9.4になる。加藤、武井両氏により発明されたCo系OP磁石は磁気選鉱機用へのみ使用され生産量はたいしたことはなかった。1952年にフィリップス社からBa系、Sr系フェライト磁石が発表されると日本の研究所でも研究が進み、日本での生産も検討された。住友金属工業は将来フェライト磁石が重要な位置を占めると予見して1956年9月にフィリップス社と技術提携し生産を開始した<sup>6)</sup>。他の国内の企業はフィリップス社の特許がネックになって

生産をひかえていたが、理研のBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>入りBa、Sr系フェライト磁石の特許が認められると、日立金属、TDK、三菱電機などが、1965年頃から生産を開始した。その後、東北金属、住友特殊金属、東京フェライト製造なども参入した。その単価の安さからフェライト磁石はもてはやされ、日本はもとより世界中でフェライト磁石産業は拡大していった。

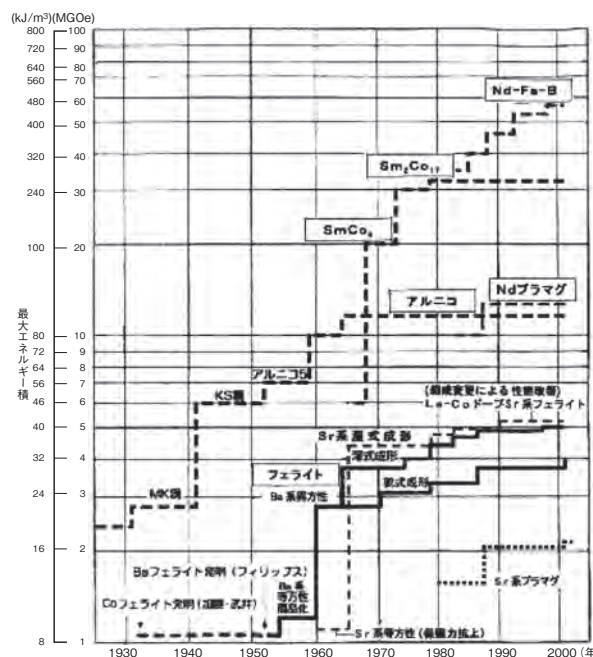


図 9.4 ハードフェライト技術の系統化<sup>5)</sup>

1967年頃からBa系フェライト磁石に代わってSr系フェライト磁石が生産されている<sup>7)</sup>。BaよりSr系フェライトの方が抗磁力(Hc)が大きく、キュリー温度が高いなどの特色があるためである。しかし、1990年代からわが国の焼結フェライト磁石、フェライトボンド磁石の生産は伸びが鈍化している。これは画期的な磁石特性を有するNd-Fe-B磁石が登場したためである。

上記のようにフェライト磁石工業界にとっては厳しい状況下で朗報が飛び出した。それはTDK<sup>8)</sup>や日立金属<sup>9)</sup>の技術者らによるLa-Zn、La-Co置換Sr系フェライト磁石の開発である。フェライト磁石ではもはや改良は無理と思われていた特性の上限値を突破した高性能Sr系フェライト磁石の登場である。エネルギー積が5 MGoeを超える強力な磁石は、モータ類の小型化に貢献し用途の拡大につながるものと期待されている。

〈参考文献〉

- 1) 杉本光男：日本応用磁気学会誌 Vol.23 P1729 (1999)  
M. Sugimoto：J. Am. Ceram. Soc. Vol.82 P269 (1999)
- 2) 村田製作所発行：メタモルフォシス Vol.9 P8-9 (2003)
- 3) T. Akashi：Trans. JIM Vol.2 (1961)
- 4) Y. Shichijo, G. Shichijo and E. Takama: J. Appl. Phys. Vol.35 [Communication] P1646 (1964)
- 5) 日本電子材料工業会：“磁石のはなし” P4 (2001)
- 6) 住友特殊金属 編：住友特殊金属三十年史 P29 (1995)
- 7) A. Cohardt: J. Appl. Phys. Vol.38 P1904 (1967)
- 8) 田口仁、武石卓、諏訪建一郎：日本応用磁気学会誌 Vol.21 P901 (1997)
- 9) Y. Ogata, Y. Kubota, T. Takami and T. Shinohara：IEEE Trans. On Magnetics Vol.35 P3334 (1999)



# 10 | 考察とまとめ

1932 年加藤・武井両氏により発明された酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) を主成分とするフェライトについてその技術の系統化を行った。フェライトを含めた日本の電子部品・デバイスが世界生産額 63 兆 7747 億円（対前年比 107%）のプラス成長の中で、日系企業の生産額は 18 兆 6622 億円（対前年比 105%）と世界生産額の 29% を占めており、今やわが国からの部品供給がなければ、大半の電子機器が世界で生産できない状態になっている。このような状況はしばらくは続くものと思われる。しかし、中期的には周辺諸国の著しい技術

発展を見ると、後発からの追撃で今の座を奪われかねない。わが国のセラミック電子部品産業が生き残れる条件は、独創的な技術で 21 世紀が求める電子材料を提供し続ける以外には道はない。フェライト部品産業はセラミックコンデンサ部品などと比べると峠を越えた感があるが、さらなるフェライトの進化を信じている。フェライトが日本発信の技術であることに自負をもって、今後は産官学が連携して世界に先駆けた材料開発のスタートをしなければならない。

## 謝 辞

資料収集に当っては以下の学協会、企業の方々のご協力を頂きました。

厚くお礼申し上げます。また、(社) 電子情報技術産業協会 電子部品部部長代理 佐藤秀樹氏、日経 BP 社テクニカルライター 岡本明氏には年表、統計データ等についてコメントを頂きました。

日本セラミックス協会  
日本ボンド磁性材料協会

電子情報産業技術協会  
日本ファインセラミックス協会

T D K (株)  
(株) 村田製作所  
住友特殊金属 (株)  
日本電気 (株)

太陽誘電 (株)  
日立金属 (株)  
(株) 東芝  
京セラ (株)

# 11 | 登録資料候補一覧

## フェライト登録候補一覧

| 番号 | 名 称                   | 資料<br>形態 | 所在地       | 製作者   | 製作年       | 選 定 理 由                                   |
|----|-----------------------|----------|-----------|-------|-----------|-------------------------------------------|
| 1  | 巻線チップインダクタ            | 展示       | 群馬県吾妻市    | 太陽誘電  | 1980      | 携帯、デジタル機器の普及により使用された小型、高性能な角型チップインダクタ     |
| 2  | 各種ソフトフェライト            | 展示       | 東京都港区     | 日立金属  | 1990      | 酸化鉄を主成分とする軟質の磁性材料、電気抵抗が高く、高周波領域での磁性が優れている |
| 3  | スイッチング電源用小型電源トランス     | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1975      | Mn-Zn系フェライトを用い小型化、高効率電源トランス               |
| 4  | フェライト磁石               | 展示       | 東京都港区     | 日立金属  | 2000      | 自動車用ブラシ付DCモータなどに使用される低コストフェライト磁石          |
| 5  | アイソレータ CES 20         | 展示       | 京都府長岡京市   | 村田製作所 | 2005      | イットリウム、鉄、ガーネットを用いた携帯電話機用小型アイソレータ          |
| 6  | 世界最初のトランス用フェライトコア     | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1930      | 加藤、武井両氏によるフェライトを用いた世界初のトランスとフェライトコア       |
| 7  | 中間周波トランスの構造とフェライト     | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1947～1980 | スーパーヘテロダイン方式のラジオに使われた中間周波トランスとコア材料        |
| 8  | 初期のフライバックトランスとフェライトコア | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1955      | 初期の白黒TVに使用されたフライバックトランスとフェライトコア           |
| 9  | フェライト電波吸収体            | 実体       | 千葉県市川市    | TDK   | 1969      | 磁気緩和現象に着目した新しいタイプの電波吸収体                   |
| 10 | 磁気ヘッド                 | 展示       | 山梨県南アルプス市 | TDK   | 1970      | 磁気媒体を磁化することで信号を記録、再生、消去ができる磁気ヘッド          |
| 11 | 積層チップインダクタ            | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1980      | フェライトと導体材料をミクロンオーダーで積層した超小型インダクタ          |
| 12 | 積層チップLCフィルタ           | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1983      | フェライトと誘電体セラミックスを一体積層、同時焼成して作製した超小型フィルタ    |
| 13 | トランス用フェライトコアの代表形状     | 展示       | 秋田県にかほ市   | TDK   | 1960～2005 | Mn-Zn系、Ni-Zn系フェライトを用いた小型トランス用フェライトコア      |

| 番号   | 用語          | 定義                                                                                                                                                                   | 対応英語 (参考)              |
|------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 2426 | フェライト       | 狭義には亜鉄酸 ( $\text{H}_2\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) の金属塩を指していたが、最近では鉄を含む複合酸化物の総称。結晶構造によって①スピネル型フェライト、②ペロブスカイト型フェライト、③ガーネット型フェライト、④マグネトプラムバイト型フェライトに分類される。磁性材料として重要な地位を占める。 | ferrite                |
| 2427 | バリウムフェライト   | 化学式 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ で示されるマグネトプラムバイト型フェライト。代表的な永久磁石材料である。                                                                                             | barium ferrite         |
| 2428 | マンガン亜鉛フェライト | Mn, Znを含むスピネル型フェライト。高透磁率、高磁束密度の磁性材料。低損失の磁心の代表的な材料である。単結晶フェライトも磁気ヘッド用として用いる。                                                                                          | manganese-zinc ferrite |
| 2429 | ニッケル亜鉛フェライト | Ni, Znを含むスピネル型ソフトフェライト。マンガン亜鉛フェライトよりも抵抗率が高く、より高周波帯域用に適している。                                                                                                          | nickel zinc ferrite    |
| 2430 | ソフトフェライト    | ヒステリシス曲線が細く保磁力が小さく、外部の弱い磁界に対しても敏感に磁化されるフェライト。                                                                                                                        | soft ferrite           |
| 2431 | ハードフェライト    | ヒステリシス曲線が幅広く、保磁力が大きい。外部磁界に対し磁化されにくいフェライト。                                                                                                                            | hard ferrite           |



## 国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第13集

---

平成21(2009)年5月29日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館  
産業技術史資料情報センター  
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館  
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20  
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク