

4.2 ソフトフェライトセラミック

4.2.1 概要と歴史

ソフトフェライトセラミック（軟磁性を利用するもの）は、高透磁率を特長とするフェライトセラミックであり、トランス、インダクタ、磁気ヘッド、偏向ヨーク、モータなどの磁気コアとして広く使われている。磁気コア用磁性材料としてはケイ素鋼板やパーマロイのような合金磁性材料も、商用周波数帯では広く使われており、これらはフェライトセラミックと比較して DC 透磁率と飽和磁束密度の大きいことが特長である。しかし比抵抗が小さいため使用周波数が高くなるにつれ渦電流が増加し、エネルギー損失と発熱の問題が大きくなる。一方、フェライトセラミックの最大の特長は酸化物であるために比抵抗が非常に大きく、渦電流損失が抑制されることにある。そのためフェライトセラミックは特に高周波領域で使用される磁気コアに多用されている。また、ソフトフェライトセラミックの焼結体はいわゆる「焼き物」であるために形状付与性に優れ、複雑な形の磁気コアを大量に使用する場合は製造コスト面での利点もある。

磁性材料としてのフェライトセラミックの本格的な研究は 1930 年代初めに世界に先駆けて東京工業大学の加藤、武井両博士によって始められ、32 年には CuZn 系を中心とするソフトフェライトセラミック焼結体磁気コアの特許（特許 98844 号）を取得している。そして 30 年代半ばには東京電気化学工業（現、ティーディーケイ）による工業生産が開始された。その後、オランダのフィリップス フルーイランペンファブリケン社により NiZn 系が、国内でも MnZn 系が開発されてソフトフェライトセラミックの磁気特性が向上するとともに、各種電気、電子機器産業の隆盛により需要も拡大し、ソフトフェライトセラミックの生産量は著しい伸びを示した。近年、国内生産量は頭打ちになっているが、これは生産コスト低減のために中国を初めとする海外生産にシフトしているためであり、世界規模での需要は依然として拡大しており、また使用周波数帯の高周波化に対応した技術開発も活発に行われている。

4.2.2 材料技術

(1) 基本組成

1930 年代の初期のフェライトセラミックから現在に至るまで、実用ソフトフェライトセラミックの大部分は、化学式 MFe_2O_4 （M は主として 2 価の金属イオン）で表わされるスピネル型フェライトセラミックである。この結晶構造は立方晶であり、M および Fe イオンはある規則性を持って、4 個の酸素イオンが形成する四面体の中心（A 位置）あるいは 6 個の酸素イオンが形成する八面体の中心（B 位置）に位置する。A 位置のイオンの磁気モーメントと B 位置のイオンの磁気モーメントは互いに逆向きになっており、その差分がスピネル型フェライトセラミックの正味の磁気モーメントとなる。このように逆向き磁気モーメントの差分が材料としての磁気モーメントなる磁性体はフェリ磁性体と呼ばれ、スピネル型フェライトセラミックの飽和磁束密度が合金系軟磁性材料に比べて小さい原因のひとつとなっている。スピネル型フェライトセラミックは M イオンとして種々の複数の金属イオンを幅広い組成範囲で入れることができ、その種類と組成によって磁気特性は大幅に変化するので、使用条件に対応して最適化した成分、組成のスピネル型フェライトセラ

ミックが製品化されている。

ソフトフェライトセラミックとして重要な磁気特性は、第一に透磁率が大きいことである。DC 透磁率を大きくするには飽和磁束密度を大きくし、結晶磁気異方性と磁気歪を小さくすることが必要であり、これらは成分、組成によってある程度制御できる。上述のようにスピネル型フェライトセラミックはフェリ磁性体なので、飽和磁束密度を大きくするためには A 位置イオンと B 位置イオンとの磁気モーメントの差を大きくしてやればよい。亜鉛 (Zn) はスピネル型フェライトセラミックに添加すると必ず A 位置に入り、しかも磁気モーメントが小さいので、亜鉛を添加すると飽和磁束密度は増加する。ただし多く入れ過ぎるとキュリー温度が低下するので実用的には最適値がある。結晶磁気異方性および磁気歪を小さくするには M イオンとしてさらに別の元素を添加して、これらが小さくなる最適組成を選ぶ。このような考えで得られたのが、磁気コア用ソフトフェライトセラミックの代表例である MnZn 系フェライトセラミック、NiZn 系フェライトセラミックである。

なお、ソフトフェライトセラミックの基本組成は磁気特性の観点だけでなく、製造上の利点に基づいて選択されることもある。例えば NiZn 系にさらに銅 (Cu) を添加すると焼成に必要な温度を低下させることができ、製造コスト低減、適用範囲拡大という利点が生まれる。

(2) 粒界制御

MnZn 系は、スピネル型フェライトセラミックの中では飽和磁束密度と DC 透磁率が大きいために最も多く使用されるソフトフェライトセラミックであるが、比抵抗が比較的小さいために高周波領域での渦電流損失が問題となる。そこで高周波用 MnZn 系焼結体では結晶粒界を高抵抗化して比抵抗を大きくするという改良が行われてきた。その代表例が酸化カルシウム (CaO) と酸化ケイ素 (SiO₂) の同時添加であり、これにより比抵抗の大きい酸化カルシウム、酸化ケイ素が粒界に偏析し、全体としての比抵抗を大きくすることができる。

ただし、フェライトセラミックの焼成時に結晶粒が大きく成長してしまうとこのような粒界抵抗の寄与を実効あるものにできないので、焼成時の結晶成長を抑える元素、酸化物の添加も行われている。

(3) 磁壁制御

NiZn 系は MnZn 系に比べて飽和磁束密度が小さいものの、比抵抗が約 5 桁以上も大きいために MHz 帯以上の高周波用磁気コアとして利用されている。しかし渦電流損失の少ない NiZn 系でも周波数が高くなると残留損失と呼ばれる別の損失が増加してくる。残留損失の中には磁壁が印加磁界の周波数と共鳴を生じることに起因する損失がある。磁性体の磁化は磁壁移動によるものと回転磁化によるものがあり、低周波では前者の寄与が大きいが高周波では後者の寄与が増え、磁壁移動は損失を増加させるのでむしろ邪魔者になる。そこで成分、組成を変えて磁壁移動を抑制しようという改良も行われている。例えば NiZn 系に少量のコバルト (Co) を添加すると、誘導磁気異方性が大きくなって磁壁移動を抑えることができる。また添加元素により結晶粒径を小さくすると、磁気エネルギーのバランスにより磁壁が消失して磁壁移動に伴う損失をなくすることができる。