受賞記念講演：平成 23 年度技術進歩賞

高周波用途圧粉磁心及びチョークコイルの開発

徳岡 輝和, 伊志嶺朝之, 前田 徹, 松沼 健二

住友電気工業(株)アドバンストマテリアル研究所, 〒664-0016 伊丹市昆陽北 1-1-1.

Development of Powder Soft Magnetic Core Materials

Terukazu TOKUOKA, Tomoyuki ISHIMINE, Toru MAEDA and Kenji MATSUNUMA

Advanced Materials R&D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-1 Koya-kita, Itami 664-0016, Japan.

Received November 14, 2012

ABSTRACT

Recently, there has been a growing trend toward reducing society's carbon footprint. In the field of energy, clean power generation systems, such as solar and wind generators, have been promoted. In the automotive industry, electric vehicles are also replacing petrol vehicles, and energy-saving electrical appliances are in demand more than ever. Due to this trend, small and powerful power-supply devices with better conversion efficiency are increasingly demanded, and accordingly, high performance inductors are strongly required. In this study, soft magnetic powder cores, which are made by compacting soft magnetic powder coated with insulating film, were successfully improved to be applied into such inductors. The advantageous properties of the developed material are reported, and evaluation results of applying them into inductors are also reported.

KEY WORDS

soft magnetic material, inductor, choke coil, converter, inverter

1 緒 言

近年, 低炭素消費社会の実現へ向け, エネルギー分野では太陽光発電や風力発電を中心としたクリーン電力へのシフトが進んでいる。自動車分野では化石燃料による内燃機関から電気駆動システムへの移行が進んでおり, また家電分野においても消費電力低減の動きが活発である。これらのトレンドの中で重要な役割を果たすのが, 蓄電技術・エネルギー回生技術・電力制御技術であり, 所望の電力に効率よく変換する“電源デバイス”が求められている。近年では, 変換効率および部品のサイズ低減の観点からスイッチング電源が主流となっている。その中で, 変圧回路や整流回路に用いられているチョークコイルや, リアクトルと呼ばれる, 鉄心と巻線からなるインダクター部品が, 電源デバイスの性能を大きく左右する部品である。発電所・蓄電池から電子機器への一方通行であった従来のエネルギーシステムは, 今後, 消費機器で発生する余剰エネルギーの回生も含めた双方向のシステムが主流となる。これに向けて, 電源デバイスや電源用インダクターにも, 変圧/整流機能の複雑多様化や大容量電力への対応, 省スペース/コンパクト化などの性能向上が求められている。

筆者らはこれまでに, 鉄心に用いられる軟磁性材料として, 金属磁性粉末を加圧成形して得られる「圧粉磁心」の開発を行ってきた^{1,2)}。電源デバイスにおける上述の課題に対し, これまで培った技術を基礎として, 対象周波数帯域である数 100 kHz 帯へ材料特性を対応させるべく改善を図った結果, 対象用途へ適用可能で, 従来のフェライトコアに比べ優れた性能を有する高周波対応低ロス圧粉磁心材料を開発した^{3,4)}。本報では, 開発材の諸特性と, これを用いた電源コイル部品への応用例について報告する。

2 開発ターゲットに向けた現状技術と課題

電源デバイスの小型化や大容量化には, 飽和磁束密度が高く電磁変換損失(鉄損)が低い軟磁性材が必要である。Table 1 に高周波用軟磁性コアに用いられる代表的な軟磁性材と電源特性得失を一覧表で示す。電源用の鉄心として従来汎用的に用いられている軟磁性材料としては, Table 1a)のフェライトや b)の Al-Si-Fe 系のセンダスト合金や Fe-Si-B 系のアモルファス合金粉などの金属粉を用いたダストコアがある。フェライトは, 鉄損が低く電源効率優れるが, 飽和磁束密度が低い

Table 1 A benchmark of soft magnetic materials using for power supply devices.

Material	Schematic View	Magnetic material Content [Vol%]	Downsizing	Power capacity	Power efficiency	Shape complexity
Controlling factor of soft magnetic materials		-	Magnetic flux	Magnetic flux	Iron loss	Complex shape formability
a) Ferrite (spinel type)		100	F	F	E	G
b) Conventional Dust core (Fe-Si-Al, Fe-Si-B)		50 ~70	G	G	F	G
c) Amorphous foil (Fe-Si-B)		80 ~90	E	E	G	B
d) Powder magnetic core Pure Fe		90 ~95	E	E	B	E

E: Excellent, G: Good, F: Fair, B: Bad

ために、Fig. 1に示すように大容量電源に向けては動作磁束密度が不足し製品サイズや巻線としての銅使用量も増大する課題がある。一方、電源デバイスで一般的に用いられてきた、合金粉を樹脂で成型して製造される汎用のダストコアは、Table 1d)で示す圧粉磁心と同じく金属磁性粉末を圧縮成形して得られ、フェライトに比べて飽和磁束密度に優れた良好な直流重畳特性を有することから、製品の小型化が可能だが、フェライトに比べて鉄損が大きいため、発熱が大きく温度上昇や電源効率面での課題を有する。また、上記以外にも、Table 1c)で示す、高い磁束密度と変換効率を実現するアモルファス薄帯も存在するが、薄板の積層構造をとっているため複雑形状のコアを実現しにくい点や、電気抵抗が低く高周波域では変換効率が著しく低下するなどの問題があり、普及に至っていない。これらから、既存の軟磁性材料にはいずれも、今後求められる電源デバイスの小型/大電力化の実現に向けて課題を有しているのが現状であり、優れた特性を有する新しい軟磁性材が望まれている。

3 高周波対応低ロス圧粉磁心材料の開発と諸特性

3.1 開発アプローチ

Fig. 2に圧粉磁心材料の鉄損に及ぼす支配因子についてまとめた³⁾。鉄損は、ヒステリシス損失(W_h)と渦電流損失(W_e)の和からなる。静的な磁場方向の変化に必要な外部エネルギー

である W_h の低減には低保磁力化が必要であり、材料内部の不純物量の低減や磁気異方性や磁歪定数の小さな磁性合金の使用などが有効であるが、特に圧粉磁心材においては、粉末成形時に生じる歪みの熱処理による除去が重要な技術となる。一方、 W_e は誘導起電力で発生する渦電流によるジュール熱であり、 W_e の抑制には材料の電気抵抗の向上が必要である。圧粉磁心材においては粉末粒子間の電氣的絶縁処理や、粉末粒子径の微細化による渦電流発生領域の細分化などが重要な技術となる。また、 W_h は周波数の1乗に比例するのに対し、 W_e は2乗に比例することから、本開発においては高周波領域で顕著になる W_e の抑制が重要である。これまで筆者らは、低損失高飽和磁束密度を示す圧粉磁心材料の開発に対して、①高耐熱絶縁皮膜処理による高温焼鈍技術、②高電気抵抗—高飽和磁束密度を両立する薄肉均一被覆処理技術、を開発してきた^{1,2)}。本開発では更に、③軟磁気特性に優れた磁性合金粉末の採用および組成最適化技術、④圧粉体内部の組織構造制御についても検討を進めた。

3.2 実験方法

原料粉末にはアトマイズ法にて作製されたFe-Si-Al系合金粉末を用いた。合金組成の影響を調べる為に、Fe-xSi-yAl ($x=8.0$ or 9.5 mass%, $y=5.5, 6.0, 7.0$, or 8.0 mass%)の組成の粉末を準備した。原料粉末に無機金属塩を被覆処理した後、1 mass%の成形用バインダを添加した。バインダ添加は、既存工法と

Fig. 1 Applications of soft magnetic materials and typical materials.

Fig. 2 Controlling factors that affect iron loss in soft magnetic powder core.

開発工法の2種類の混合方法にて行った。Table 2に準備した粉末の条件を示す。合金組成の影響調査はSample 1からSample 5で実施し、バインダ添加法の比較は一般的なセンダスト合金の組成であるFe-9.5mass%Si-5.5mass%Alの合金粉を用いて、Sample 6とSample 7で実施した。これらの粉末を外径34 mm 内径20 mm 厚み5 mmのリング形状に980 MPaにて加圧成形した後、1073 K、窒素雰囲気中にて熱処理を施し供試材とした。得られた試験片について寸法および重量を測定し、相対密度を算出した。また、試験片に対して圧環試験を行い、強度を測定した。また直流BHアナライザを用いて直流磁化特性を測定し(印加磁界7960 A/m)、交流BHアナライザを用いて鉄損測定(磁束密度0.1 T, 周波数100 kHz)を行った。尚、この後、合金組成式に示される数値はmass%である。

3.3 Fe-Si-Al系圧粉磁心材料における粉末組成の鉄損への影響

圧粉磁心の鉄損の温度特性の変化は、Whの変化によって起こる。透磁率 μ は下記の式(1)によって表され飽和磁束密度Bs、磁歪定数 λ 、磁気異方性定数K、および内部応力 σ の影響を受ける。

$$\mu \propto B_s / \left(|a \times K| + |b \times \sigma \times \lambda| \right) \quad a, b \text{ は定数} \quad (1)$$

Whは μ と強い相関性を示し⁵⁾、原料合金の磁歪定数(λ)と結晶磁気異方性(K)の絶対値がともに0となる時に μ が最大となりWhは最小となる。しかしながら、 λ とKが0となる組成は温度とともに変化する。Fig. 3にFe-Si-Al三元系状態図における $\lambda=0$ および $K=0$ の組成線を示す⁶⁾。この線に近いほど λ やKの絶対値は小さくなる。Fig. 2に示す $\lambda=0$ の組成線は温度上昇とともに図の左側へシフトし、 $K=0$ の組成線は温度上昇とともに図の上側にシフトする。このため、室温では λ とKがともに0に近い値であるFe-9.5%Si-5.5%Alは、温度上昇により $\lambda=0$ と $K=0$ の組成線がシフトすることで λ とKの絶対値が増大しWhも増大する。この結果、鉄損は正の温度依存性を示す。一方、室温では λ 、Kの絶対値がともに大きいFe-8.0%Si-7.0%Alでは、温度上昇で $\lambda=0$ と $K=0$ の組成線がシフトすることにより λ とKの絶対値が小さくなり

Whも減少する。この結果、鉄損は負の温度依存性を示す。Fig. 4にSample 1~4の100kHzでの鉄損の温度特性を示す。組成がFe-9.5%Si-5.5%AlのSample 1では鉄損が温度に対して正の依存性を示しているのに対し、Siが8.0%, Alが6.0~8.0%のSample 2~4では298~393 Kの間で鉄損が負の温度依存性を示している。特に、組成がFe-8.0%Si-8.0%AlのSample 4では、393 Kでの鉄損が339 kW/m³と低く、Sample 1 (Fe-9.5%Si-5.5%Al)の393 Kでの鉄損と比較して約25%低い値となっている。Fig. 5にSample 4の透磁率の温度依存性を示す。透磁率は温度に対してほぼ一定の値となっている。Fig. 6に、Sample 4 (Fe-8.0%Si-8.0%Al)と、更に鉄損を低減するために粉末を微粒化したSample 5の395 Kでの鉄損を示す。Sample 5の鉄損は273 kW/m³と極めて低い値となっており、Sample 4より更に鉄損が20%低減されている。これは、微粒化により粉末の内部を流れる渦電流が減少したためと推測される。

Fig. 3 Composition lines of $\lambda=0$ and $K=0$ in Fe-Si-Al alloy.

Fig. 4 Temperature dependency of iron loss for fabricated samples.

Table 2 Compositions and Experimental procedures of developed material.

Sample No	Powder alloy composition	Sieving size	Procedure for mixing
1	Fe-9.5%Si-5.5%Al	-100 μ m	Developed
2	Fe-8.0%Si-6.0%Al	-100 μ m	Developed
3	Fe-8.0%Si-7.0%Al	-100 μ m	Developed
4	Fe-8.0%Si-8.0%Al	-100 μ m	Developed
5	Fe-8.0%Si-8.0%Al	-50 μ m	Developed
6	Fe-9.5%Si-5.5%Al	-150 μ m	Developed
7	Fe-9.5%Si-5.5%Al	-150 μ m	Conventional

Fig. 5 Temperature dependency of permeability for sample 4.

Fig. 6 Iron loss comparison between sample 4 and sample 5.

3.4 Fe-Si-Al 系圧粉磁心の粉末粒子配列の諸特性への影響

Table 3 に Sample 6 と Sample 7 の相対密度, 圧環強度および磁気特性を, Fig. 7 に断面 SEM 観察写真を示す. 断面観察結果から, 既存の工法で混合を行った Sample 7 では粉末が粒度毎に凝集し, 粉末の配列状態が不均質であるのに対し (Fig. 7 (b)), 開発工法で混合した Sample 6 では凝集の見られ

(a) Sample 6 (Developed procedure)

(b) Sample 7 (Conventional procedure)

Fig. 7 Cross-sectional SEM photographs of the material mixed in each procedure.

ない均質な組織になっていることがわかる (Fig. 7 (a)). この結果 Sample 6 では, 粗粒間の空隙を微粒が埋めることにより粉末が密に充填され, Sample 7 と比較して高い相対密度が得ら

Table 3 Properties of fabricated materials mixed in each procedure.

	Procedure for mixing	Relative density (%)	Radial crushing strength (MPa)	Magnetic flux density* B (T)	Maximum permeability	Iron loss** (kW/m³)	Wh (kW/m³)	We (kW/m³)
Sample 6	Developed	82.5	34	0.51	99	463	172	291
Sample 7	Conventional	79.6	16	0.45	85	560	206	354

* Measured at 7960 A/m, RT

** Measured magnetic flux density 0.1T, frequency 100kHz, RT

れている。また、磁気特性では、Sample 6はSample 7と比べて磁束密度および透磁率が高く、鉄損は小さくなっている。このうち、磁束密度と透磁率の向上は、相対密度の向上が原因と推測される。また、鉄損の低減は、Sample 6ではSample 7に比べてWeが減少したことが主な原因であり、これは、Sample 7では粗粒同士が直接隣り合っているため、粗粒ネットワークを介した大きな渦電流の発生が原因と推測している。この粉末の配列状態に関する定量的な評価技術の確立は、今後の課題である。

3.5 開発材の諸特性と既存材料との比較

Table 4に開発材として、合金組成の検討、および粉末の微粒化によって低損失化を図ったSample 5、およびバインダ添加加工法の検討によって低損失化を図ったSample 6とフェライト諸特性、Fig. 8に開発材の鉄損の周波数依存性、Fig. 9の直流磁化曲線を示す。飽和磁束密度は、Mn-Zn系フェライトに対し2倍近い値を示している。

4 開発材の電源コイルへの応用

4.1 開発材を用いた電源コイルの設計と試作

合金組成の検討で低損失化を図った開発材(Sample 4)を用いて、電源コイルとしての性能を調べるために、ハイブリッド自動車などの次世代型環境対応車に搭載される電源コイル想定し、大容量2次電池からエアコン、パワーステアリングなどの電動補機を駆動する電圧への降圧に用いるDC-DCコンバータを適用対象に選定した。電源コイルの設計は、Table 5に示す条件仕様に基づいて行った。コア形状の設計は、以下に示す式(2)~式(4)に基づいて、リングサンプルの直流磁化特性からインダクタンスLsが目的の値となるように形状を決定した。比較材は、用意したコンバータに予め搭載されていたフェライトコアとした。巻線は、フェライトコアと同じ形状の平角線とした。

設計は、以下に述べる2ケースを行った。ひとつ目は、同じ巻線条件のもとで、より省スペース化、特に実装面積の低

Fig. 8 Frequency dependency of iron loss of the developed material.

Fig. 9 DC magnetization curves of developed materials.

Table 4 Magnetic properties of the developed material.

	Sample 5 (Developed material)	Sample 6 (Developed material)	ferrite ⁶⁾
Material	Fe-8.0%Si -8.0%Al	Fe-9.5%Si -5.5%Al	Mn-Zn ferrite
Relative density	80%	83%	—
Saturation flux density*	0.82T	0.87T	0.53T
Initial permeability*	33	92	3300
Iron loss** (kW/m³)	393K : 273 (RT : 500)	RT : 463	RT : 70

* Measured at RT ** Measured at magnetic flux density 0.1T, frequency 100kHz

Table 5 Specifications for designing inductor.

Input voltage: V_{in}	200 V
Output voltage: V_{out}	14 V
Output Current: I_{dc}	100 A
Frequency: f	100 kHz
Inductance: L_s	$2.6 \mu\text{H}$
Coil windings	$8 \times 2 \text{ mm}$ rectangular wire

$$L_s = \frac{N^2}{R_m} \quad (\text{Equation 2})$$

$$B_{max} = \frac{LI_{max}}{NS} = \frac{NI_{max}}{R_m S} \quad (\text{Equation 3})$$

$$R_m = \frac{l_c}{\mu_r \mu_0 S} + \frac{l_g}{\mu_0 S} \quad (\text{Equation 4})$$

N : number of coil windings

I : DC Current

S : core cross sectional area

l_c : core magnetic path length

l_g : gap length

μ_r : relative permeability

μ_0 : space permeability

減を主体としたケース (以下, Case 1) を検討した。ふたつ目は, 巻線数をフェライト材より低減することを主眼としたケース (以下, Case 2) を検討した。巻線は部品コストや製品重量に占める割合が大きいため, 巻線数や使用量の低減のニーズは高い。Table 6 に開発材を用いた電源コイルの設計結果および実際に作製したコイルの外観写真を示す。開発材は,

Fig. 10 DC bias characteristics of fabricated inductors.

上述の通りフェライト材に対して飽和磁束密度特性に優れるため, Case 1, Case 2 ともに形状的なメリットを見出している。Case 1 では, 同じ巻線数 5 ターンにて実装面積やコア体積, 全体重量を大きく低減できており, Case 2 では, 開発材を用いることで巻線数を低減し部品の低背化や軽量化が実現できている。

4.2 試作電源コイルの評価

Fig. 10 に試作コイルのインダクタンスの直流重畳特性を示す。開発材を用いたコイルの特性は, Case 1, Case 2 ともにほぼ同じ特性を示している。設計条件 ($L_s 2.6 \mu\text{H} @ I_{dc} 100 \text{ A}$) に対して, $2.4 \mu\text{H}$ とおおよそ設計値に近い値が得られた。一方, 既存のフェライトコアと比較すると, フェライトコアは仕様条件である 100 A を超える高電流領域から急激にインダクタ

Table 6 Designing results and images of fabricated inductors.

Core material		Ferrite	Developed material	
—		—	Case1	Case2
Part view				
Mounting area		1120mm ²	760mm ² (-35%)	1120mm ²
Part height		28mm	25mm (-11%)	22mm (-25%)
Core	Weight	70g	59g (-16%)	75g (+7%)
	Volume	14cm ³	10cm ³ (-30%)	13cm ³ (-7%)
Coil	Number of windings	5turns	5turns	4turns
	weight	71g	66g (-7%)	59g (-17%)
Overall weight		141g	125g (-12%)	134g (-5%)

Fig. 11 Temperature dependency of inductance.

Fig. 12 Temperature dependency of saturation flux density.

ンスが低下しているのに対して、開発材は高電流領域においても比較的高いインダクタンスを示す。このフェライトコアの高電流域でのインダクタンスの低下は、磁気飽和により透磁率が低下することにより生じ、飽和磁束密度が低いことが原因である。このことから、飽和磁束密度に優れる開発材を用いることで、フェライトコアに対して部品の小型化や巻線数の低減を図った上で、更に高電流領域での使用が可能となり、突発的な異常電流が発生した際にコイル特性が失われ、周辺機器にトラブルを与える危険性を低減できる。Fig. 11に直流電流 100 A におけるインダクタンスの温度依存性の測定結果を示す。開発材は室温から 150°C まで安定したインダクタンスを示すのに対して、フェライトコアは 90°C 以上の温度域で急激にインダクタンスが低下する。開発材とフェライトの間で見られるこの温度依存性の差異の原因は、飽和磁束密度の温度依存性と関係があると考えられている。Fig. 12に示すように、フェライトでは飽和磁束密度は 150°C で室温に対して半減するのに対して、開発材では 10% 程度の低下に留

Fig. 13 Ambient temperature dependency of core temperature.

まっている。このため、開発材では、ほぼ一定のインダクタンスであるのに対し、フェライトでは低下傾向を示すといえる。これは、強磁性体が常磁性体に変化する温度を示すキュリー温度がフェライトは 200°C 前後であるのに対して、開発材は 500°C と極めて高いことが主因として挙げられる。

4.3 試作電源コイルのコンバータ実装評価

作製した電源コイルを、上述の市販の車載用降圧型 DC-DC コンバータへ実装し、Table 5 にて示した電源仕様に動作させ、コアおよびコイルの温度上昇を評価した。尚、電源デバイスには予め水冷ジャケットによる冷却機構が備わっていたので、これを用いた（水冷温度は 60°C）。電源デバイスでは、電源コイル部品の発熱により、電源コイル自体だけでなくその周辺部品への影響も無視できないため、デバイス自体の信頼性向上には電源コイルの温度上昇は重要な課題である。

Fig. 13 に、試作電源コイルのコアの表面温度の雰囲気温度依存性を示す。開発材は、Case 1, Case 2 の間で部品形状の違いが主因と思われる若干の差異はあるが、フェライトコアとほぼ同等の動作温度を示している。このことから、開発材とフェライトとの鉄損特性の差は、電源デバイスでの動作状態では温度上昇として大きな差を生じないことが分かった。

5 結 言

本研究では、低炭素消費社会の実現へ向け、これまで当社が培ってきた高性能圧粉磁心材料の材料技術を基礎として、近年ニーズが高まっている電源コイル部品へ適用可能な新しい Fe-Si-Al 系圧粉磁心材料の開発に取り組んだ。

合金粉末の組成と圧粉磁心における鉄損の温度依存性の関係を明確にし、微粗均一の粒子配列とすることにより磁気特性を向上させた。また、開発材を用いた電源コイルを設計試作し、既存のフェライトコアに対して小型化や温度上昇抑制のメリットを確認した。

謝 辞

本検討の一部は独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「H21 年度イノベーション実用化助成事業」の助成を受けて実施した。関係者に深く感謝する。

文 献

- 1) Shimada, et al.: "Development of High Magnetic Performance P/M Soft Magnetic Material", SEI Technical Review, **162**(2003) 50-56.
- 2) T. Maeda, et al.: "Development of Low-iron-loss Sintered Magnetic Material", SEI Technical Review, **166**(2005)1-6.
- 3) A. Watanabe, et al.: "Magnetic properties at high frequency of

high density and low loss powder magnetic core", Abstracts of Spring Meeting of JSPM, (2010)116.

- 4) T. Ishimine, et al.: "Magnetic properties at high frequency of high density and low loss powder magnetic core", Abstracts of Spring Meeting of JSPM, (2010)117.
- 5) Y. Aikawa, N. Kato: "Effect of Composition on Core Loss of Fe-Si-Al Powder Compressed Cores", Sanyo Technical Report, **7**(2000)29-34.
- 6) M. Takahashi, et al.: "The magnetostriction for Sendust alloys single crystal", Journal of the Magnetics Society of Japan, **11** (1987)251-254.