

技術資料



Technical Data

Fe-Si 系圧粉磁心の磁気特性に及ぼす Si 量の影響

武本 聡*

Influences of Si Content on Magnetic Properties of Fe-Si Powder Cores

Satoshi Takemoto

Synopsis

Soft magnetic powder cores have been used for choke coils, reactors of switching regulators and DC-DC converters for power supplies. Recently, Fe-Si powder cores have been applied to inverter systems of hybrid cars, so the role of powder cores has been more important. The demands to powder cores are to have higher magnetic flux density which makes core size smaller and to have smaller core loss. In this paper the author has studied the influences of Si content on core density, B-H curve, core loss and DC bias characteristic in the Fe-Si powder cores.

When the amount of Si content increases,

- 1) Core density and relative density decrease.
- 2) Magnetic flux density decreases.
- 3) Core loss decreases. Both hysteresis loss and eddy current loss decrease.
- 4) DC bias characteristic becomes lower.

1. 緒 言

圧粉磁心とは表面に電氣的絶縁処理を施した軟磁性金属粉末をプレス成形した磁心である。軟磁性金属として純鉄、Fe-Si 系や Fe-Si-Al 系、Fe-Ni 系などの金属材料が用いられている。

出力が数百 W 程度以下の小電力用途では、周波数が 50 kHz ~ 1 MHz 付近のスイッチング電源や DC-DC コンバータのチョークコイル用の磁心としてソフトフェライトコアが従来から用いられてきた。軟磁性金属粉末を用いた圧粉磁心はソフトフェライトコアよりも飽和磁束密度が高いため①磁心の小型化が可能なこと②高い電気抵抗率により高周波動作での損失が低いことより、電気回路部品への適用が広がっている。

一方、出力が kW 以上の大電力用途においては、従来から高 Si 珪素鋼板を積層した磁心がリアクトルに用いられてきた。近年、これらの大電力用電源においてもスイッチング周波数が 10 ~ 20 kHz 程度と高周波化が進んでいる。粉末粒径が珪素鋼板の厚みよりも小さい圧粉磁心の方が渦電流損を小さく抑えることができるため、珪素鋼板よりも有利である。このような背景のもと、アトマイズ粉末を用いた圧粉磁心の検討や適用が広がっている^{1)~4)}。

また、モーター用途など制御回路のスイッチング周波数が 1 kHz 程度以下の領域では、いまだ圧粉磁心の損失は珪素鋼板の積層磁心よりも大きく適用があまり進んでいない。圧粉磁心のコアロス低減を図ることができれば、自動車用の駆動モーターなどへの適用はさらに広が

2011 年 6 月 10 日受付

*大同特殊鋼(株)高機能部材事業部 (Advanced Functional Materials Div., Daido Steel Co., Ltd.)

ると期待される。

本報告では、アトマイズ法で作製した Fe-Si 系粉末を用いて圧粉磁心を作製し、直流磁気特性、コアロス特性に及ぼす Si 量の影響について明らかにした。

2. 実験方法

純鉄粉を用いた圧粉磁心は飽和磁束密度が高く直流重量特性が優れているため小型化には有利であるが、鉄損が大きいため、高効率や発熱が問題になる磁心には不向きである。鉄損を低減するには純鉄に Si, Al, Ni など合金元素を添加することにより、結晶磁気異方性や磁歪を低減する手段が取られている。それぞれ Fe-Si 系, Fe-Si-Al 系 (センダスト), Fe-Ni (パーマロイ) 系が代表的な組成である。

その他の手段としては、粉末粒径の適正化、結晶粒径の粗大化による渦電流損とヒステリシス損の低減が報告されている。

Fe-Si 系はセンダストやパーマロイに比べ鉄損は大きいものの飽和磁束密度が高く直流重量特性に優れているため、高磁界が印加される大電流用途に適している⁵⁾。本報告では Fe-Si 系について着目し、1 ~ 6.5 mass% まで Si 量を変化させて磁気特性に及ぼす影響を調査した。

2. 1 試験材

用いた粉末の成分組成は Fe-1, 3, 5, 6.5 mass%Si とし、改良型水アトマイズ法³⁾を用いて粉末を作製した。各種アトマイズ粉は、150 μm 以上の粉末を網で篩って除去した後、結晶粒粗大化による軟磁気特性の向上を狙い、不活性ガス雰囲気中で 1223 K で 10.8 ks の熱処理を施した。

熱処理後のアトマイズ粉の成分分析値および粉末特性について、Table 1 および Table 2 に示す。

粉末の外観の SEM 観察写真および圧粉磁心の断面組織観察写真を Fig.1(a) および Fig.1 (b) に示す。これらの写真は、代表例として粉末粒径が 63 ~ 75 μm のものを示している。粉末の形状はやや長細く引き伸ばされた角の取れた球形に近い形をしている。また1つの粉末内に結晶粒径が数個存在している様子が観察される。

2. 2 圧粉磁心の作製

試験粉末にバインダーおよび粉末間の電氣的絶縁のために、溶媒に溶かしたシリコーン樹脂を粉末に対して 0.5 mass% の割合で添加、混合した。溶媒を揮発させた後に 1000 μm 以下に篩った。その粉末を用いて、油圧

Table 1. Chemical compositions of Fe-Si powders.

	Chemical composition (mass%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O	N
Fe-1 mass%Si	0.006	0.84	0.03	0.004	0.007	0.01	0.01	0.03	0.01	0.12	0.002
Fe-3 mass%Si	0.003	2.95	0.02	0.004	0.003	0.01	0.01	0.02	0.01	0.21	0.004
Fe-5 mass%Si	0.006	4.90	0.05	0.004	0.005	0.01	0.02	0.02	0.01	0.35	0.004
Fe-6.5 mass%Si	0.002	6.31	0.16	0.010	0.009	-	0.01	0.07	-	0.17	0.002

Table 2. Particle size distributions of Fe-Si powders.

	Particle size distribution [%]				
	~106	106~75	75~63	63~45	~45
	μm	μm	μm	μm	μm
Fe-1 mass%Si	26.5	25.1	12.3	15.0	21.1
Fe-3 mass%Si	57.9		23.4		14.7
Fe-5 mass%Si	29.5	31.6	13.0	13.2	12.7
Fe-6.5 mass%Si	14.5	26.2	13.2	16.9	29.2

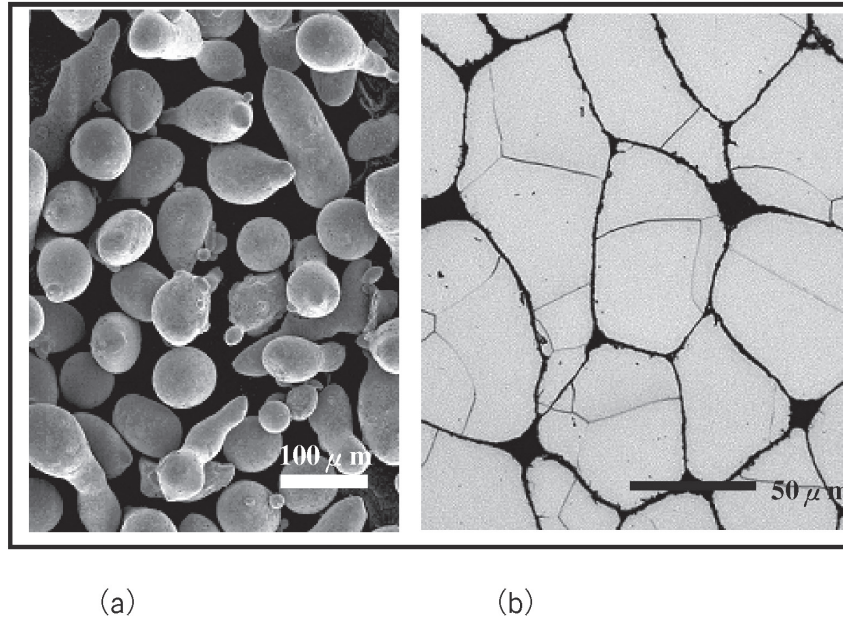


Fig.1. SEM Photographs of Fe-3 mass%Si powder(a) and cross section of microstructure of Fe-3 mass%Si powder core(b).

プレス機にて常温，成形圧力 1270 MPa で外径 28 mm × 内径 20 mm × 高さ 4 mm のトロイダル形状の圧粉磁心を成形した．一部，圧粉磁心の密度を変化させるために成形圧力を 39 MPa ~ 1960 MPa まで変化させた．磁心の歪み除去のため，Ar 雰囲気中で 1023 K で 3.6 ks の熱処理を実施した．

2. 3 特性評価

直流磁化曲線の測定は，BH トレーサー（電子磁気工業製：BH-5501）を用いて，最大印加磁界 16 kA/m までの測定を行った．

コアロス測定は，交流 BH アナライザー（岩通計測製：SY-8232）を用いて，最大励磁磁束密度 B を 0.2 T と一定にし，周波数 f を 1 ~ 30 kHz の範囲内で変化させて測定した．また，コアロス P_c におけるヒステリシス損失 P_h と渦電流損失 P_e の分離を以下のように行った．式(1)，式(2)に示すように，コアロスを周波数で割った値 P_c/f の周波数依存性から，この P_c/f を 0 Hz に外挿した値を 1 周期あたりのヒステリシス損失係数 ($K_h = P_h/f$) とし，ここから各周波数でのヒステリシス損失 P_h を計算した．渦電流損失 P_e は P_c から P_h を差し引いた残りとした⁴⁾．

$$P_c = P_h + P_e = K_h \cdot f + K_e \cdot f^n \dots \dots \dots (1)$$

$$P_c/f = K_h + K_e \cdot f^{n-1} \dots \dots \dots (2)$$

直流重量特性の測定は，LCR メーター（HP 製：4194）を用いて，直流印加磁界を 0 ~ 11200 A/m まで変化させたときの微分比透磁率を測定した．

3. 実験結果

3. 1 磁心の密度

Fig.2 に 1270 MPa で成形したときの Si 量と磁心の密度および相対密度の関係を示す．相対密度とは磁心の密度を真密度で除した値である．Si 量が増加するほど磁心の密度および相対密度は低下する傾向が見られる．得られた密度は，Fe-1 mass%Si では 7.26 g/cm³（相対密度 94 %），Fe-6.5 mass%Si では 6.80 g/cm³（相対密度 90 %）であった．Si 量が増加するに従い密度が低下するのは，粉末の硬度が高くなるため粉末が塑性変形しにくいことが原因と考えられる．

Fig.3 に成形圧力と相対密度の関係を示す．ここでは主に Fe-3 mass%Si と Fe-6.5 mass%Si について表す．いずれの場合も成形圧力が高くなると相対密度も高くなる傾向がある．成形圧力が低い領域では成形圧力を増加させたときの磁心の密度の上昇分は大きい，成形圧力が高くなるとだんだん磁心の密度は飽和に近づく．いずれの成形圧力の場合も Fe-3 mass%Si の方が Fe-6.5 mass%Si よりも相対密度が高い．

3. 2 直流磁化曲線

Fig.4にそれぞれのSi量における直流BH曲線を示す。Si量が増加するのに伴い、BH曲線の傾きは緩やかになり、それぞれの磁界における磁束密度も低くなる傾向が見られる。Si量が増加するに従い前述した磁心の密度が低くなることと、素材のバルク体としての飽和磁束密度が低下するためと考えられる⁶⁾。

Fig.5にSi量と最大透磁率 μ_m および相対密度と μ_m の関係について示す。Si量が増加すると最大透磁率は

低下する傾向が見られる。また同じ相対密度の場合も、Si量が増加すると最大透磁率は低くなっている。

Fig.6にSi量と16000 A/m印加したときの磁束密度 B_{16000} 、および相対密度と B_{16000} の関係について表す。磁束密度も最大透磁率の場合と同様に、Si量が増加すると B_{16000} は低下する傾向が見られる。また同じ相対密度の場合も、Si量が増加すると B_{16000} は低くなっている。これらの結果はSi量が増加するに従い、素材のバルク体としての飽和磁束密度が低下するためと考えられる。

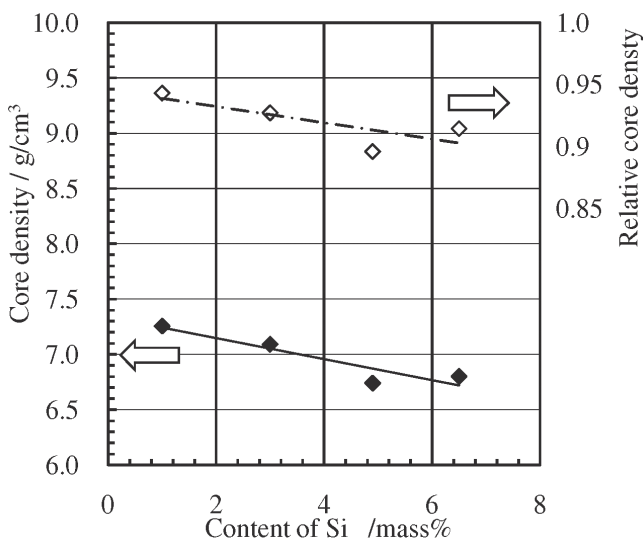


Fig.2. Influence of Si content on core density and relative density.

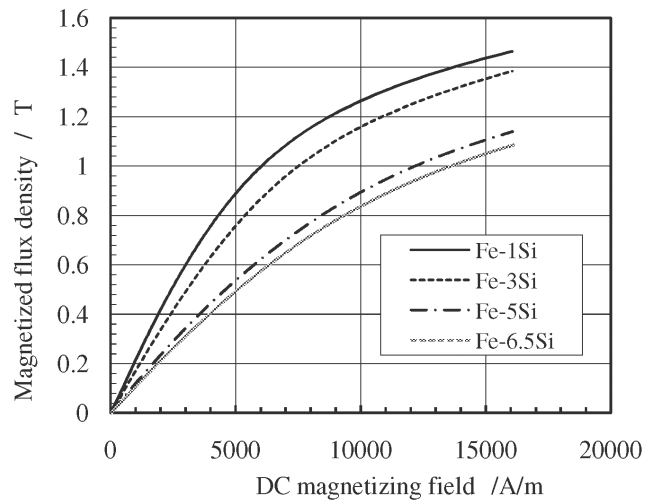


Fig.4. BH curves in different Si content of powder core.

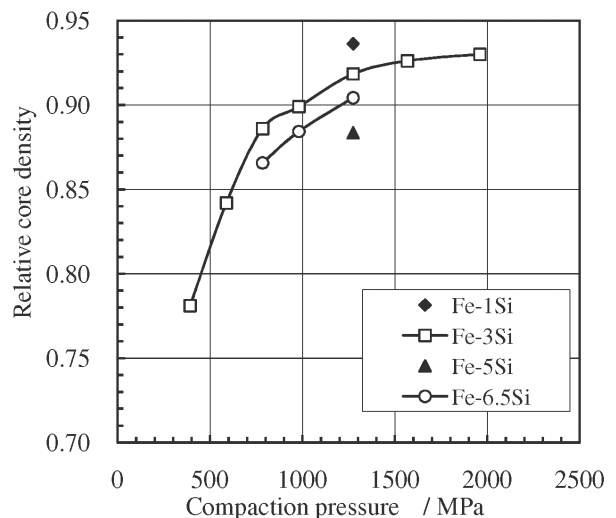
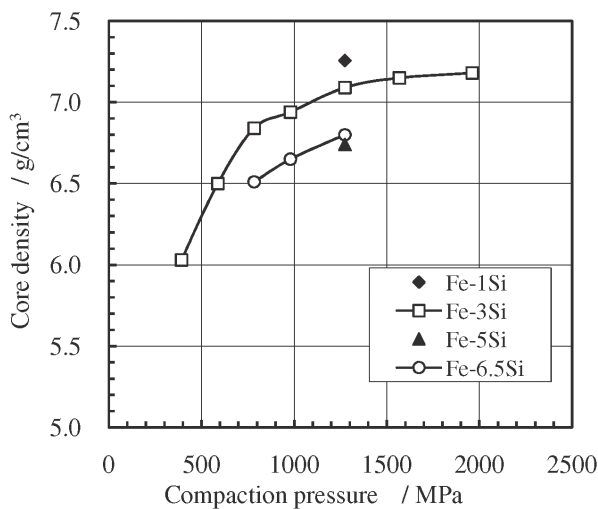


Fig.3. Influence of compaction pressure on core density and relative core density.

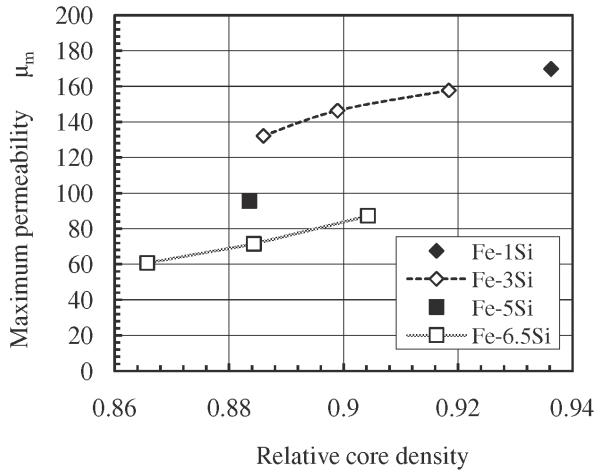
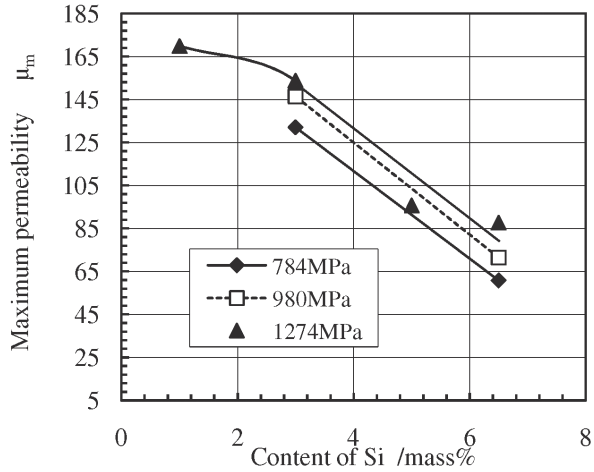


Fig.5. Influences of Si content and relative core density on maximum permeability.

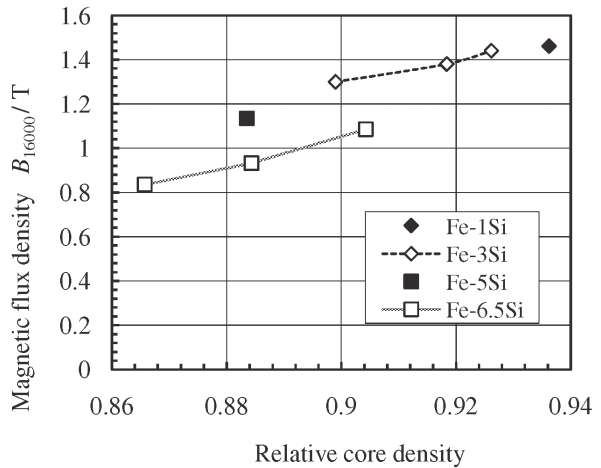
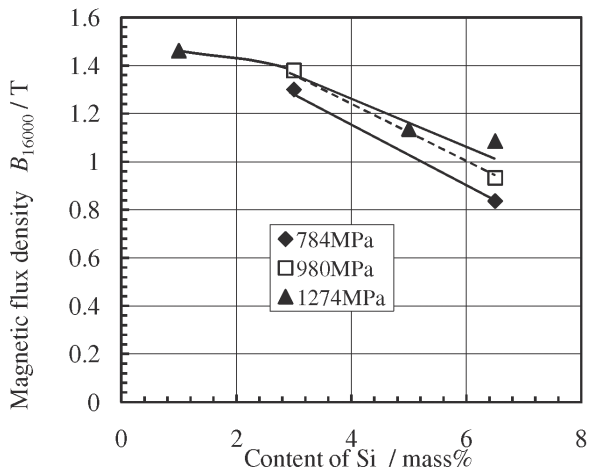


Fig.6. Influences of Si content and relative core density on magnetic flux density.

3. 3 コアロス特性

Fig.7 に励磁磁束密度が 0.2 T, 周波数が 10 kHz および 30 kHz のコアロス特性を示す. 図中にはコアロスをヒステリシス損と渦電流損に分離した値も同時に示す. いずれの周波数でも Si 量が増加すると, コアロスは減少する傾向が見られる. これらは Si 量が増加するとヒステリシス損と渦電流損の両方が減少するためである. 周波数が 10 kHz の場合はヒステリシス損が主な損失であるが, 周波数が 30 kHz と高周波化すると渦電流損の比率が増大している. 10 kHz の場合, Fe-1 mass%Si のコアロスは約 550 kW/m³, Fe-6.5 mass%Si は約 300 kW/m³ であるのに対し, 30 kHz の場合, Fe-1 mass%Si のコアロ

スは約 2650 kW/m³, Fe-6.5 mass%Si は約 1250 kW/m³ と周波数が高くなるほど Si 量によるコアロスの差は広がる傾向が見られる.

Fig.8 にそれぞれの Si 量におけるコアロスの周波数依存性について示す. いずれの周波数においても Si 量が増加するとコアロスが減少する傾向が見られる. Fig.9 にヒステリシス損と渦電流損についても周波数特性を示す. いずれの周波数でも Si 量が増加するとヒステリシス損も減少している. 一般にバルク体では Si 量が増加すると結晶磁気異方性定数や磁歪定数が減少するため保磁力が減少することが知られている^{7),8)}. このためヒステリシス損が減少するものと考えられる. ヒステリシス損の周波数依存性, つまり両対数グラフの直線の傾きに

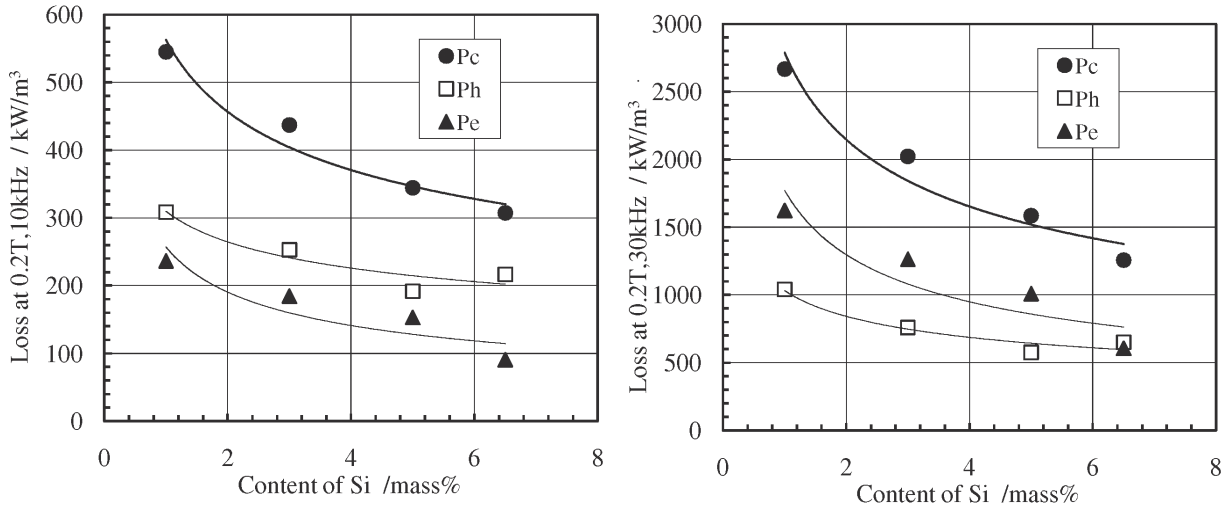


Fig.7. Influences of Si content on core loss properties at 10 kHz and 30 kHz.

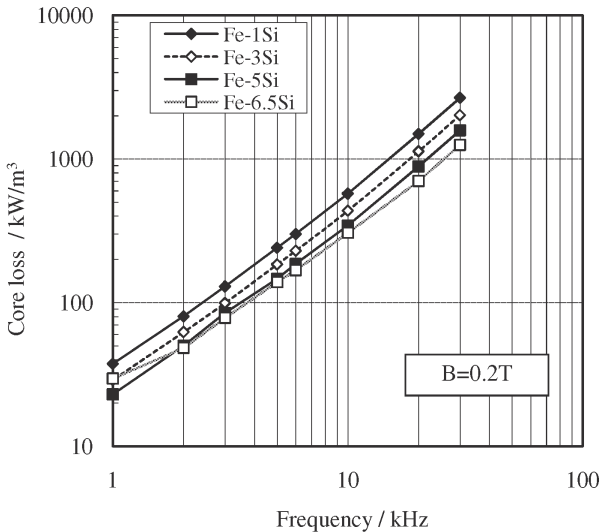


Fig.8. Influences of Si content on core loss in different frequencies.

については Si 量によらずほぼ同等である。これは式(1)で表したように、ヒステリシス損は周波数に比例すると定義しているからである。

渦電流損においても、いずれの周波数でも Si 量が増加すると渦電流損は減少している。バルク材では Si 量が増加すると電気抵抗率が増加するため渦電流損が減少するとされている。バルク体の電気抵抗率の値はそれぞれおよそ、Fe-1 mass%Si では $0.2 \mu\Omega\text{m}$ 、Fe-3 mass%Si では $0.45 \mu\Omega\text{m}$ 、Fe-5 mass% では $0.65 \mu\Omega\text{m}$ 、Fe-6.5 mass%Si では $0.8 \mu\Omega\text{m}$ である⁸⁾。ヒステリシス損と渦

電流損のいずれに関しても、圧粉磁心でもバルク材と同様の傾向が得られた。

渦電流損の周波数依存性に関しては Si 量によってやや異なる傾向が見られている。Si 量が増加するに従い、渦電流損の周波数依存性が小さくなる(直線の傾きが小さい)傾向が見られる。これは式(2)に示したように、渦電流損は周波数の n 乗に比例し、 n の値が Si 量によって変化するためと考えられる。 n の値は Fe-1 mass%Si では 1.86、Fe-3 mass%Si では 1.72、Fe-5 mass% では 1.66、Fe-6.5 mass%Si では 1.63 が得られた。

3. 4 直流重畳特性

チョークコイルやリアクトルとして圧粉磁心を使用する場合、印加する磁界は直流磁界に交流磁界を加えた波形になる場合が多い。実用的には、初透磁率や最大透磁率ではなく、直流磁界を印加した時の透磁率が重要となる。この直流印加磁界による透磁率特性を直流重畳特性と呼んでいる。磁界を印加しても透磁率の低下が小さい磁心ほど、直流重畳特性が優れている。理想的な直流重畳特性は、高い印加磁界まで高透磁率を保持することである。しかし一般的には、初透磁率が高い磁心ほど磁界を印加したときの透磁率の低下は大きく、初透磁率が小さい磁心ほど磁界を印加しても透磁率はあまり低下せずフラットな特性を示す⁹⁾。

Fig.10 に 1270MPa で成形した場合の、Fe-1 mass%Si、Fe-3 mass%Si と Fe-6.5 mass%Si の直流重畳特性を示す。また Fig.11 には成形圧力を変化させた場合の Fe-3 mass%Si と Fe-6.5 mass%Si の直流重畳特性を示す。Fe-1

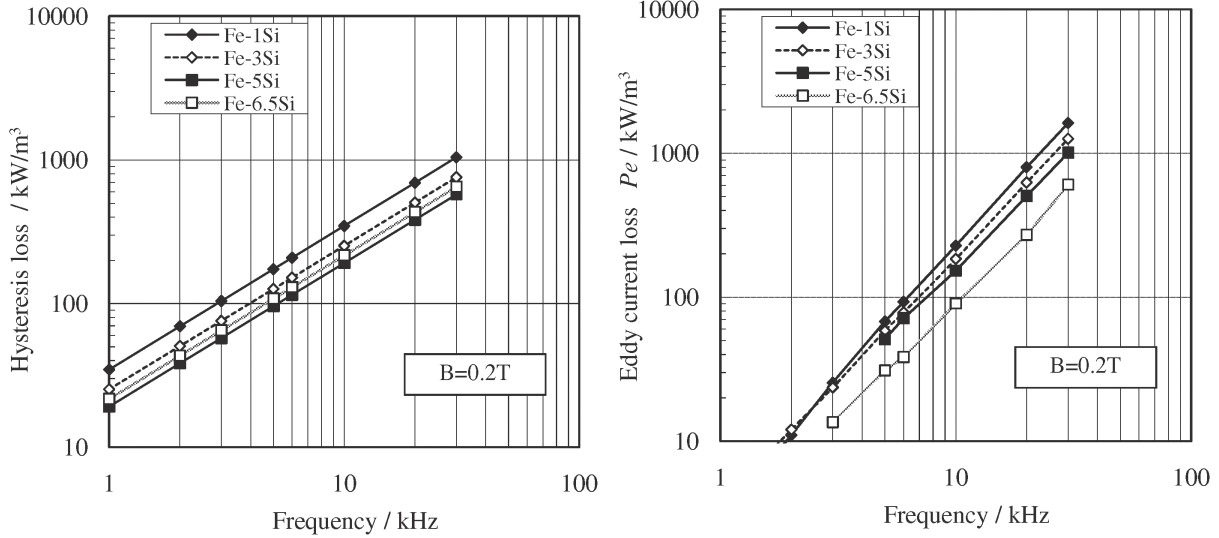


Fig.9. Influences of Si content on hysteresis loss (Ph) and eddy current loss (Pe) in different frequencies.

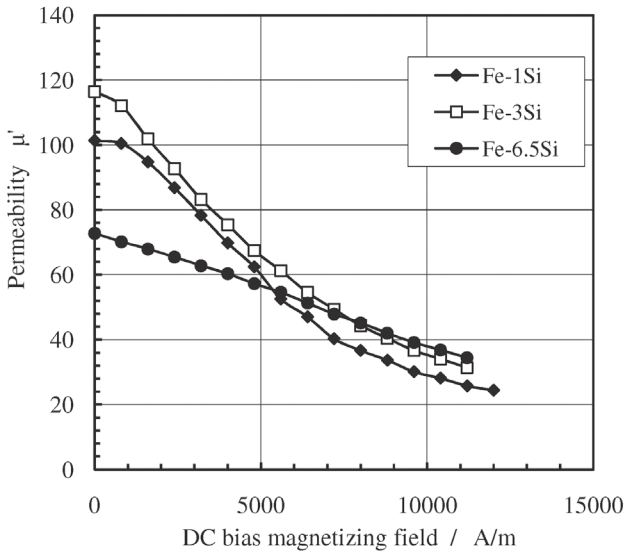


Fig.10. DC bias characteristics of various Si content.

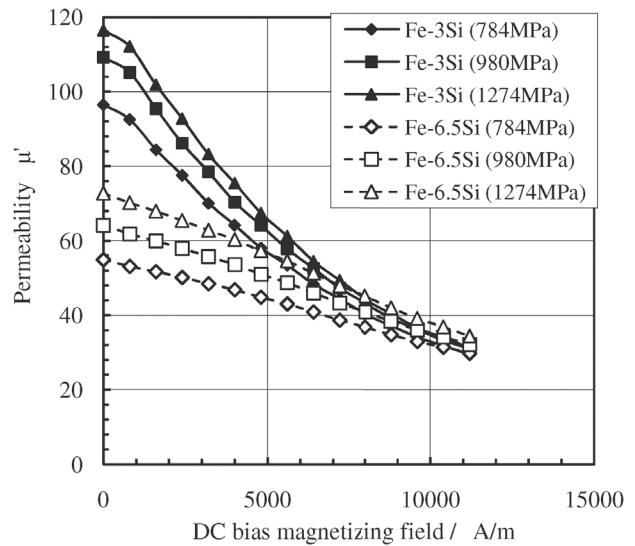


Fig.11. DC bias characteristics in different compaction pressure for Fe-3Si and Fe-6.5Si.

mass%Si, Fe-3 mass%Si は初透磁率が 96 ~ 116 と高いため、磁界を印加するとすぐに透磁率が低下する。一方、Fe-6.5 mass%Si の初透磁率は 55 ~ 73 と比較的低いため、磁界を印加しても緩やかに透磁率は低下している。8000 A/m 以上の高磁界では、初透磁率の低い Fe-6.5 mass%Si の方が Fe-3 mass% よりも透磁率が高くなる場合が見られている。

このように初透磁率の高低によって直流重畳特性は大きく変化するため、それぞれの磁心の初透磁率を合わせ

て重畳特性を比較しなければならない。今回得られている磁心では、Si 量を変えた場合、磁心の初透磁率をあわせることができなかった。このため、透磁率が初透磁率の半分になる磁界を測定データから読み取り、直流重畳特性を比較する指針とした。

Fig.12 に初透磁率と透磁率が初透磁率の半分になる磁界を示す。近似直線より同じ初透磁率でその磁界を比較すると、Fe-1 mass%Si と Fe-3 mass%Si はほとんど差は見られないが、Fe-6.5 mass%Si は Fe-3 mass%Si よりも

その磁界が小さくなる、つまり直流重畳特性が低い傾向が見られる。Si量を増加すると、3.2節で示したように磁束密度が低下するため直流重畳特性も低下すると考えられる。

3.5 まとめ

Fig.13にSi量の影響について磁束密度とコアロスとを軸にまとめた。Si量を増加させると、コアロスは低減するものの磁束密度も同時に低下してしまう。高い磁束密度と低いコアロスを得ることが理想的であるが、図に示したとおりいずれの磁心もほぼ直線状にプロットされ、磁束密度とコアロスはトレードオフになり両立は難しい。

実用的に、いずれのSi量の圧粉磁心を選ぶかは、必要な磁束密度とコアロスを満たすSi量を選択する。一般的には、低周波数領域で使用する場合はコアロスはあまり問題にならないため、磁束密度の高いSi量の少ない圧粉磁心を使用することが多い。一方、高周波領域で使用する場合はコアロスが大きくなるため、Si量の多い圧粉磁心を使用するケースが多い。

高特性化には、磁心の高密度化による磁束密度の向上および、結晶粒径の粗大化や粉末粒径の制御によるヒステリシス損および渦電流損の低減が必要である。

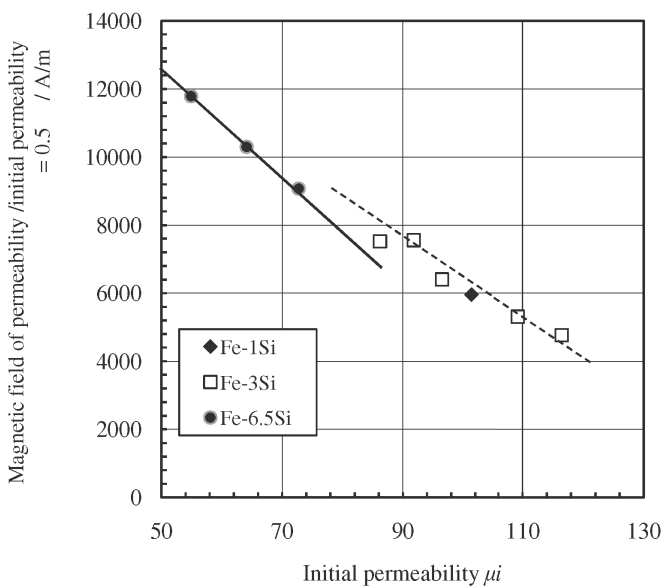


Fig.12. Relationship between initial permeability and Magnetic field of permeability /initial permeability.

4. 結論

改良型水アトマイズ法により作製したFe-1～6.5 mass%Si合金粉末で圧粉磁心を試作し、磁心密度、磁束密度、コアロス、直流重畳特性に及ぼすSi量の影響を調査し、以下の結論を得た。

- (1) Si量を増加させると密度、相対密度は低下する。
- (2) Si量を増加させると磁束密度(B_{16000})は低下する。
- (3) Si量を増加させるとヒステリシス損および渦電流損のいずれも低減するため、コアロスは減少する。
- (4) Si量を増加させると直流重畳特性も低下する。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、一連の評価測定、試作に協力いただいた大同特殊鋼株式会社研究開発本部電磁材料研究所の中尾好孝氏、伊神力氏に深く感謝いたします。原料粉の各種アトマイズ粉の試作に協力いただいた大同特殊鋼株式会社高機能部材事業部粉末部材部粉末工場の方々にも深く感謝いたします。

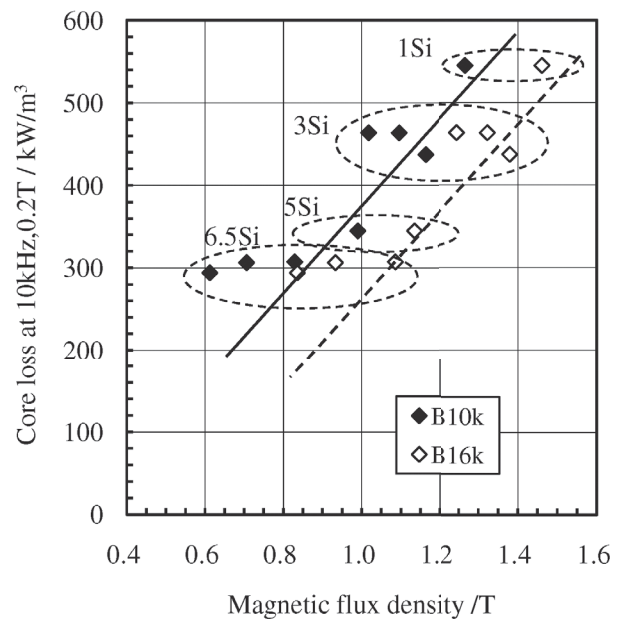


Fig.13. Magnetic flux density and core loss of various powder cores.

(文 献)

- 1) S. Takemoto and T. Saito : Materials Science Forum, (2007), 534-536, 1313.
- 2) S. Takemoto and T. Saito : Proceedings of the 2004 WORLD CONGRESS OF POWDER METALLURGY & PARTICULATE MATERIALS, (2004).
- 3) 齊藤貴伸, 武本 聡 : 電気製鋼, 77(2006), 285.
- 4) 武本 聡, 齊藤貴伸 : 電気製鋼, 81(2010), 118.
- 5) 武本 聡 : 特殊鋼, 58(2009), 6, 17.
- 6) 電気学会マグネティックス技術委員会編 : 磁気工学の基礎と応用, コロナ社, (1999), 62.
- 7) 本間基文, 日口章 : 磁性材料読本, 工業調査会, (1998), 107.
- 8) 山本達治 : 磁性合金, 修教社書院, (1941), 70.
- 9) 武本 聡, 齊藤貴伸 : 電気製鋼, 73(2002), 229.