

# Fe-Si-Al系圧粉磁心の損失に及ぼす組成の影響

相川 芳和\*・加藤 信行\*

Effect of Composition on Core Loss of Fe-Si-Al Powder Compressed Cores

Yoshikazu Aikawa and Nobuyuki Kato

Synopsis: The effect of Si and Al contents for Fe-Si-Al alloy powder was studied from the viewpoint of core loss. For powder compressed core material, Sendust (Fe-10%Si-6%Al) is well-known as the one providing both high permeability and low core loss. However, the core loss of Sendust compressed core increases as temperature rises. Since this temperature characteristic possibly causes "thermal run away", temperature consistency (negative dependence is preferred) of core loss as well as high permeability has been desired.

As a result, decreasing Si content from the basic Sendust composition, we found that there was some composition region where core loss has negative dependence on temperature. The optimum composition with which high permeability and good core loss behavior are compatibly obtained was Fe-8.8mass%Si-6.0mass%Al.

Although the core loss behavior has been mostly explained with magnetocrystalline anisotropy constant K, the result of this study was found to agree with the change of magnetostriction constant  $\lambda$ .

Key words: powder compressed core; Fe-Si-Al powder; temperature characteristic of core loss; magnetocrystalline anisotropy constant; magnetostriction constant

## 1. 緒言

近年の電気・電子機器の小型化，高周波化には目覚ましいものがあり，今後もその要求は更に強くなるとみられている。この動向に対応するためには，電子部品の中でも特にインダクタンス部品（コイル部品）の小型化・低背化が必須とされており，これに用いられる磁性体（磁心）の高透磁率化，低損失化が求められている。

従来から磁心には，Mn-Zn系，Ni-Zn系に代表されるフェライトが用いられてきたが，これらフェライト磁心は飽和磁束密度が低いことから大電流下では透磁率が著しく減少するという欠点を有している<sup>1)</sup>。そのため，フェライト磁心では大容量化が進むパソコン等の小型化の要求には対応できなくなってきた。

一方，圧粉磁心は金属磁性粉末をバインダーと混合して加圧成形したものであり，飽和磁束密度がフェライトコアと比較して大きいことから，大電流下でも高透磁率を保つことが可能であり，部品の小型化の要求にも対応できるという利点がある。現在，圧粉磁心用として検討されている金属材料には，純Fe，Fe-Si系，Fe-Ni系等があるが，なかでもFe-Si-Al系合金，特にFe-10mass%Si-6mass%Al近傍のいわゆるセンダスト組成は，結晶磁気異方性定数（K），磁

歪定数（ $\lambda$ ）が常温でともにほぼ零であることから<sup>2)</sup>，透磁率が大きく磁気損失が小さいためフェライト磁心に替わる材料として注目されている。

しかしながら，このセンダスト組成の粉末を用いた圧粉磁心は，常温以上で損失が温度上昇とともに単調増加するという特徴を有している。このような磁心材は，実際の部品として使用した場合の温度域（80～120 程度）での損失が常温よりも大きくなるという課題があると同時に，損失による発熱がさらに損失の増大につながる結果，熱暴走を招く危険性があるため，特に大出力のトランス等に用いるのは困難とされていた。

本研究では，Fe-Si-Al系合金粉末を用いた圧粉磁心の損失の温度特性に及ぼす組成の影響に着目した。当社ガスアトマイズ粉末を用いて検討した結果，常温での損失が低く，さらに温度勾配が常温以上で負となるFe-Si-Al系合金の組成領域を見出すことができた。

さらに得られた結果から圧粉磁心材の温度特性を決定する因子について考察したので報告する。

## 2. 実験方法

Fig.1に本実験のフローチャートを示す。原料粉末はアル

\* 技術研究所 新材料グループ

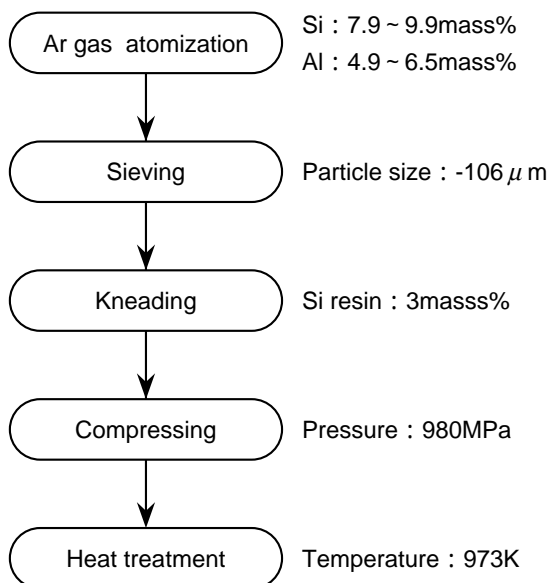


Fig. 1. Experimental procedure

ゴンガスアトマイズ法により作製し、主成分はSi : 7.9 ~ 9.9mass% , Al : 4.9 ~ 6.5mass% , 残部Feとした。この粉末を-106 $\mu$ mに分級した後、バインダーとしてSi樹脂を金属粉末に対して3mass%混合した。その混合粉を一軸プレスにて、980MPaで加圧し、外径25mm、内径15mm、厚み10mmのトロイダル形状（JIS C2531に準拠）の成形体を得た。その後、粉末の内部歪み軽減とバインダーの硬化を目的としてN<sub>2</sub>雰囲気下で973K-30minにて熱処理を行った。Fig.2に熱処理後の試験片の外観を示す。



Fig. 2. Appearance of specimens

樹脂混合前のガスアトマイズ粉末は、その外観を走査型電子顕微鏡（SEM）で観察した。さらに振動試料型磁束計（VSM）により飽和磁化（I<sub>s</sub>）を測定し、Hcメーターにより最大印加磁場144kA/mにおける保磁力を測定した。

リング状試験片については所定数の巻線を施した後、BHアナライザーにより周波数50kHz、最大磁束密度0.1T、

雰囲気温度293 ~ 393Kにおける損失および透磁率を測定した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 粉末特性

Fig.3に本実験で作製した粉末のSEMによる外観の一例を示す。本実験で用いたガスアトマイズ粉末はいずれの組成も表面性状の滑らかな球状粉であることがわかる。またTable1に粉末の酸素分析値ならびに保磁力を示す。いずれの組成も酸素値は300ppm以下であった。保磁力は熱処理前で90 ~ 180A/m、さらに熱処理を施すことにより65A/m以下まで低下した。

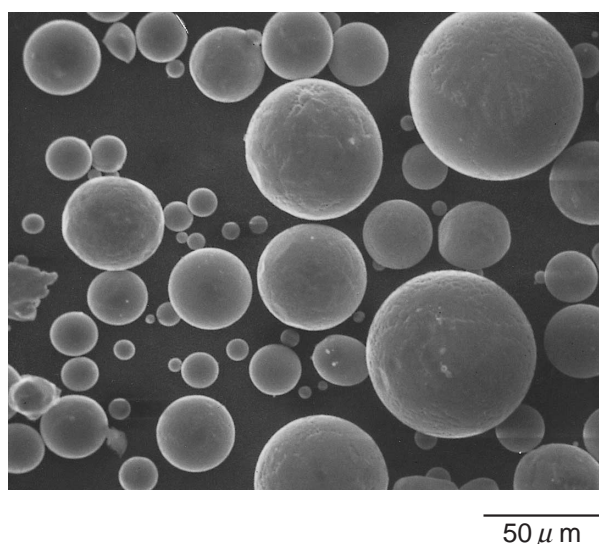


Fig. 3. SEM photograph of Fe-8.8Si-6.0Al gas atomized powder

Table1. Oxygen amount and coercive force of Fe-Si-Al powder

Composition	Oxygen (ppm)	Coersive force /kA/m	
		as atomized	973K
Fe-7.9Si-5.9Al	160	179	64
Fe-8.8Si-6.4Al	180	116	40
Fe-8.3Si-5.9Al	230	150	52
Fe-8.8Si-6.0Al	210	115	39
Fe-8.9Si-4.9Al	260	99	35
Fe-9.4Si-5.9Al	150	90	32
Fe-9.9Si-5.9Al	140	134	48
Fe-9.8Si-5.5Al	220	166	60
Fe-9.6Si-6.5Al	190	147	51

用いた粉末の飽和磁化（I<sub>s</sub>）はTable2に示すとおりで、0.85 ~ 1.17Tであった。この値はFig.4に示すとおり、Feの原子比に一次に依存することがわかった。

Table2. Saturated magnetization of Fe-Si-Al powder

Composition	Is/T
Fe-7.9Si-5.9Al	1.15
Fe-8.8Si-6.4Al	0.97
Fe-8.3Si-5.9Al	1.14
Fe-8.8Si-6.0Al	1.03
Fe-8.9Si-4.9Al	1.17
Fe-9.4Si-5.9Al	0.97
Fe-9.9Si-5.9Al	0.93
Fe-9.8Si-5.5Al	0.97
Fe-9.6Si-6.5Al	0.85

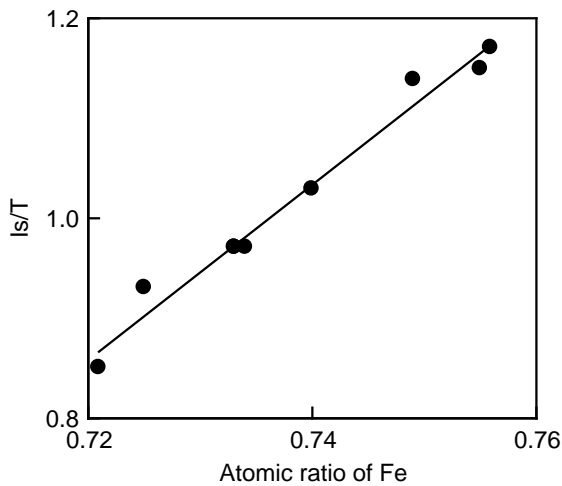


Fig. 4. Relationship between saturated magnetization of Fe-Si-Al powder and atomic ratio of Fe

### 3・2 コア特性

Fig.5に本実験で作製した圧粉磁心の損失の温度特性を示す。本実験の温度範囲では、圧粉磁心の損失はいずれの組成も200～500kW/m<sup>3</sup>であり、圧粉磁心としては低いレベルであった。また、その温度特性は組成によって異なり、Alが4.9～6.5mass%においてSiが9.4mass%以上の場合、損失の温度勾配は正となった。一方、Siが7.9～8.9mass%の場合、損失の温度勾配は負となることがわかった。

特にFe-8.8mass%Si-6.0mass%Alの場合、部品とした時の使用温度域となる373Kでの損失が240kW/m<sup>3</sup>と低く、従来のセンダスト組成（Fe-10mass%Si-6mass%Al近傍）と比較して約半分程度の値であった。以上示したように、本実験により損失のレベルが低く、常温以上での損失の温度勾配が負となるFe-Si-Al系の組成領域を初めて見出すことができた。

Fig.6にFig.5と同様の条件で測定した透磁率の温度特性を示す。本実験で作製した圧粉磁心の透磁率はいずれの組成も75～85程度の値を示した。透磁率の温度特性はFig.5で示した損失の温度特性とは逆の挙動を示し、損失の温度勾配が負であった圧粉磁心の透磁率の温度勾配は正であり、損

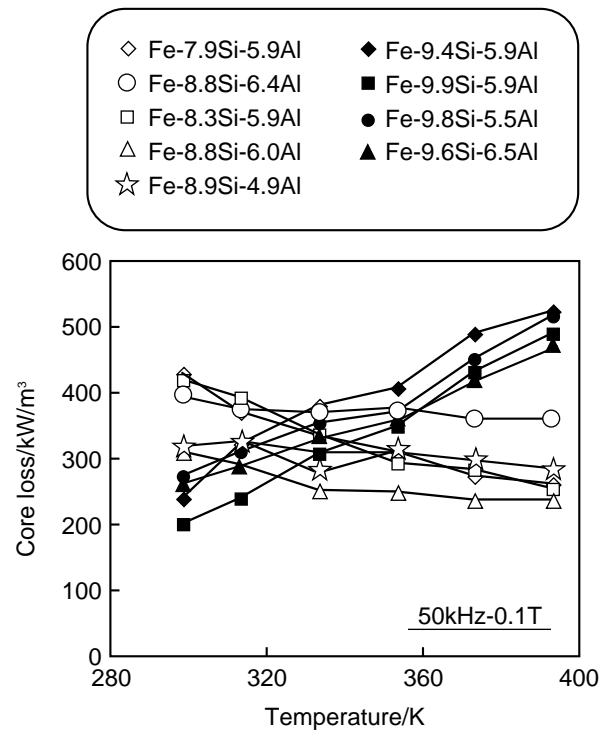


Fig. 5. Effect of temperature on core loss of Fe-Si-Al powder compressed cores

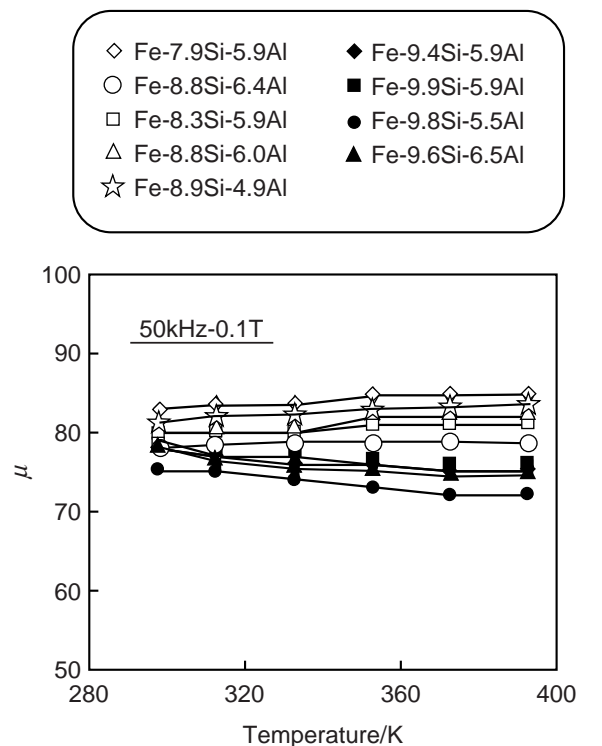


Fig. 6. Effect of temperature on permeability of Fe-Si-Al powder compressed cores

失の温度勾配が正の圧粉磁心については透磁率の温度勾配は負になることがわかった。

#### 4. 考察

##### 4.1 フェライト磁心の温度特性

以上示した実験結果について考察するにあたり、フェライト磁心の温度特性について従来の考え方を以下に説明する。

Fig.7にフェライト磁心における結晶磁気異方性定数 ( $K$ )、透磁率 ( $\mu$ )、磁気損失の温度変化を模式的に示す。 $K$ は

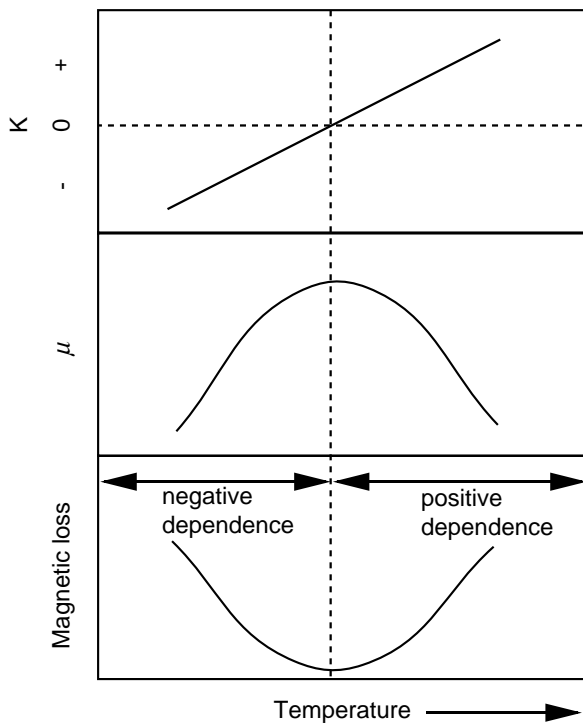


Fig. 7. Schematic illustration of the relationship between magnetocrystalline anisotropy constant ( $K$ ), permeability ( $\mu$ ), magnetic loss and temperature.

磁壁移動の容易さを示す定数であり、一般に温度上昇に伴って単調増加し、透磁率、磁気損失はある温度で極大および極小となる<sup>3)</sup>。フェライト磁心の場合、透磁率が極大となり磁気損失が極小となる時の温度は $K$ が0となる時の温度に対応しており、これは $K=0$ の時に磁壁の移動が最も容易になるという考え方で理解されている。また、Fig.7から $K$ が負となる温度領域では損失の温度勾配は負となり、 $K$ が正となる温度領域では損失の温度勾配は正となることわかる。このような知見を利用して、Mn-Zn系のフェライト磁心では組成および焼成条件を制御することにより、Fig.8に示すように $K$ が0を横切る温度を常温より高温側へシフトさせることにより、負の損失の温度勾配を実現している。

##### 4.2 圧粉磁心の温度特性

前述のフェライト磁心における損失の温度特性に関する知見をもとに本実験結果について考察した。Fig.9にFe-Si-

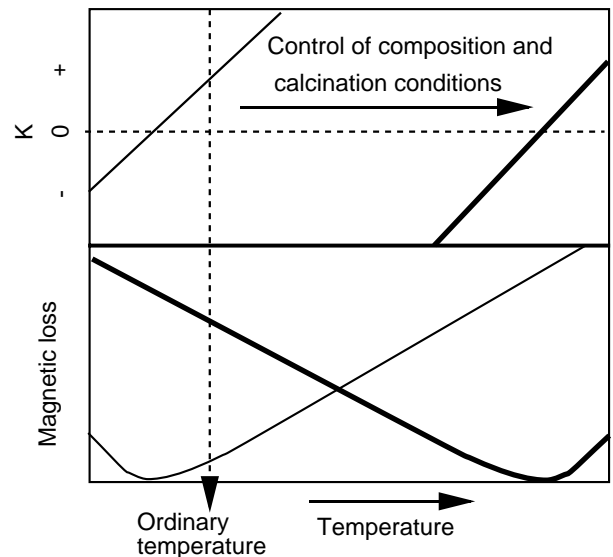


Fig. 8. Variation of gradient in case of Mn-Zn ferrite cores

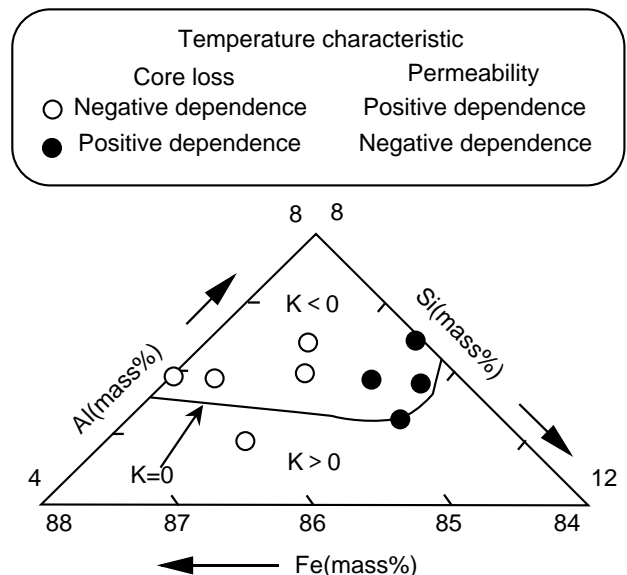


Fig. 9. Composition line of  $K=0$  at room temperature in Fe-Si-Al alloy

Al合金の結晶磁気異方性定数 ( $K$ ) の常温での符号と組成の関係を示す<sup>4)</sup>。本実験で作製した組成は図中にプロットした通りであり、損失の温度勾配が正であった磁心材がいずれもほぼ $K < 0$ の領域にあることがわかる。圧粉磁心の損失の温度特性がフェライト磁心と同様に結晶磁気異方性定数に依存するとした場合、Fig.7から常温で $K < 0$ の場合には損失の温度勾配は負となることから、従来の結晶磁気異方性定数の考えだけでは本実験結果を十分に説明できないことがわかる。

そこで磁壁移動の容易さを示すもう一つの材料特性である磁歪定数 ( $\lambda$ ) に着目した。Fig.10にFe-Si-Al合金の飽和磁歪定数 ( $\lambda$ ) の常温での符号と組成の関係を示す<sup>4)</sup>。この図から損失の温度勾配が負であった材料はいずれも  $\lambda$

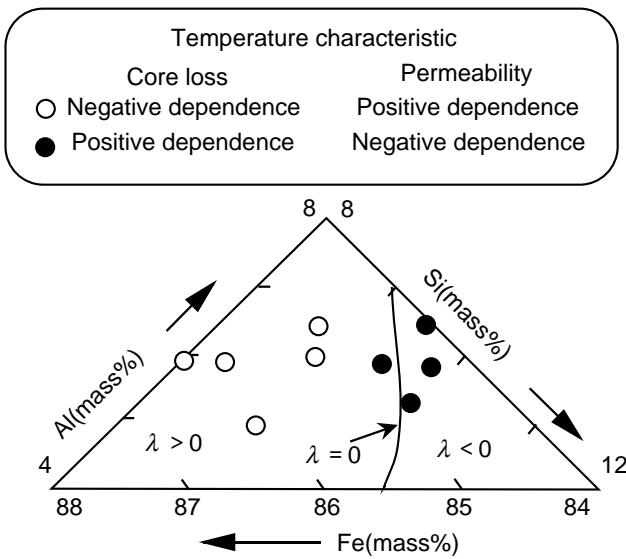


Fig. 10. Composition line of  $\lambda = 0$  at room temperature in Fe-Si-Al alloy

が正の領域であるのに対して、損失の温度勾配が正であった材料はいずれも  $\lambda$  が負の領域にあることがわかった。また、 $\lambda$  は一般に温度上昇に対して単調減少する。ここで圧粉磁心の場合、Fig.11に示すとおり  $\lambda$  が0となる時に磁気損失が極小となり透磁率が極大になると仮定してみた。

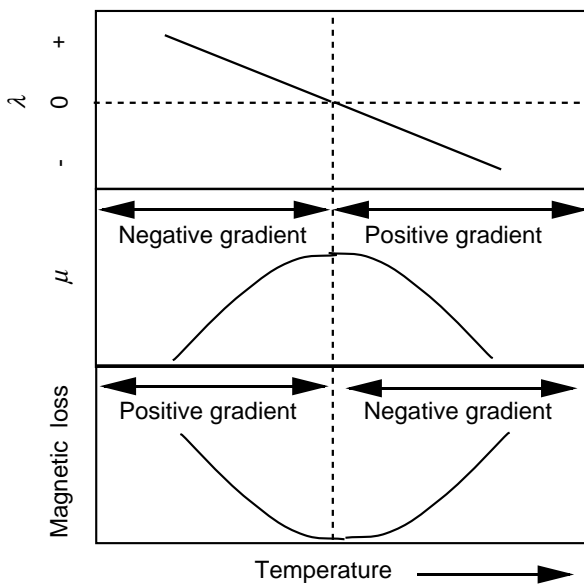


Fig. 11. Schematic illustration of the relationship between magnetostriction constant ( $\lambda$ ), permeability ( $\mu$ ), magnetic loss and temperature

この仮定に基づくと、 $\lambda$  が正の領域では損失の温度勾配は負となり、透磁率の温度勾配は正となる。一方、 $\lambda$  が負の領域では、磁気損失の温度勾配が正となり透磁率の温度勾

配は負となる。この仮定から導き出される結論は実験結果と一致しており、圧粉磁心の損失の温度特性は磁歪定数を用いることにより良く説明できることがわかった。

一般に透磁率 ( $\mu$ ) は飽和磁束密度 ( $B_s$ )、結晶磁気異方性定数 ( $K$ )、磁歪定数 ( $\lambda$ )、応力 ( $\sigma$ ) を用いて次式のように表される<sup>5)</sup>。

$$\mu = \frac{B_s^n}{|aK| + |b\sigma\lambda|} \dots (1)$$

a,bは定数

損失の大きさも磁壁移動の容易さが密接に関連することから、(1) 式と同様のパラメーターで表されると考えられる。圧粉磁心の温度特性が  $\lambda$  に依存する理由は、フェライト磁心と比較して成形時に大きな応力がかかるため、(1) 式中の  $|b\sigma\lambda|$  の項が  $|aK|$  よりも十分に大きくなることに起因すると考えれば矛盾なく説明できると思われる。

### 5. 結言

Fe-Si-Al系圧粉磁心の損失に及ぼす組成の影響について検討した結果、本実験条件範囲内で以下のことを明らかにした。

- SEM観察の結果、本実験で用いたアトマイズ粉末は表面性状の滑らかな球状粉であり、酸素値は300ppm以下であった。保磁力は熱処理前で90～180A/m、さらに熱処理を施すことにより65A/m以下まで低下した。
- Fig.12に示す組成領域において、圧粉磁心とした場合の損失が低く、かつ損失の温度勾配が負となることを見出した。特にFe-8.8mass%Si-6.0mass%Alでは、373Kでの損失が240kW/m<sup>3</sup> (50kHz) と従来のセンダスト組成と比較して約半分の値であった。

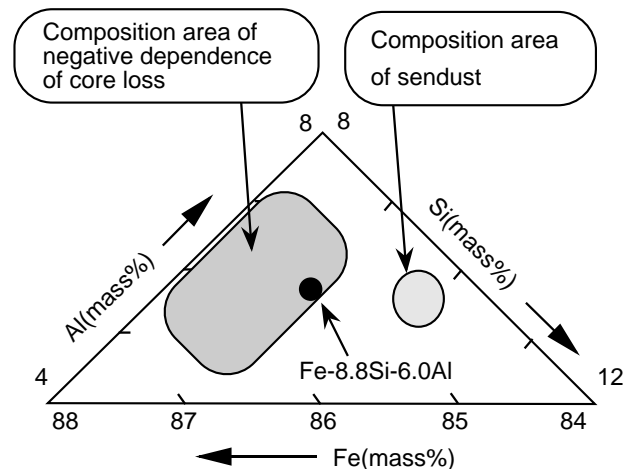


Fig. 12. Developed composition area

・実験結果について考察したところ、圧粉磁心の損失の温度特性は磁歪定数 で説明できることがわかった。

## 文 献

- 1) 茂呂 英治：スイッチング電源システムシンポジウム, B-4-1, (1996)  
1.
- 2) 近角 聡信：強磁性体の物理, 裳華房, (1984), 375.
- 3) 奥谷 克典：粉体および粉末冶金, 34 (1987), 189.
- 4) 高橋 研：応用物理, 56 (1987), No.10, 1289.
- 5) 小沼 稔：磁性材料, 工学図書, (1996), 28.

