

Fe-Cr-Si合金磁性粉末における磁気特性 および耐食性に及ぼす添加元素の影響

Effects of alloying elements on magnetic properties and corrosion resistance of
Fe-Cr-Si alloy magnetic powder

三浦 滉大*1 澤田 俊之*2

Kodai MIURA, Toshiyuki SAWADA

Synopsis: In order to improve corrosion resistance of soft magnetic spherical and flaky powder, especially Fe-Cr-Si alloy, effects of additive elements on corrosion resistance and magnetic properties were investigated. These properties were evaluated by dissolution test and magnetic measurement of coercivity, saturation magnetization and frequency dependence of permeability.

All tested powders showed excellent corrosion resistance for nitric acid regardless of shape of powder. For sulfuric and hydrochloric acid, additions of Si, Ni, Cu or Mo were effective. Moreover, corrosion resistance to sulfuric and hydrochloric acid improved with increase of Ni content.

From the viewpoint of magnetic properties, additions of Si and Al decreased coercivity and saturation magnetization. Addition of Ni content maintained low coercivity and increased saturation magnetization. On the other hand, addition of Cu or Mo increased coercivity markedly after annealing due to dispersion of Cu or Mo-rich precipitates which acted as pinning site of magnetic domain wall.

Real parts of complex permeability of magnetic sheet including flaky powders were largely different in spite of equivalent coercivity. By using Ollendorff equation, this difference was explained in terms of the volume fraction of flaky powder in magnetic sheet. If volume fractions of flaky powder in magnetic sheet were the same, addition of Ni content up to 4 mass% to Fe-Cr-Si alloy would be sufficiently effective for corrosion resistance and magnetic properties.

Key words: magnetic powder, magnetic sheet, RFID, flaky powder, corrosion resistance

1. 緒言

金属フィラーを樹脂と混練させ作製される磁性シートは、スマートフォン等の小型電子デバイスなどに広く利用されている¹⁾。その主な用途は、誤作動の原因となる電子デバイス内外で発生する電磁波を吸収し、熱エネルギーへと変換する電磁波吸収体である。

また、電磁波を用いた非接触通信を行なうICカードやICタグといったRFID (Radio Frequency Identification) 用途としても利用されている²⁾。この用途として使用される周波数域は135kHz、13.56MHzおよび2.45GHzが主流であり、特にタグの形状 (サイズ、厚さ) の優れた特性から、13.56MHzが使用されることが多い³⁾。

RFID用途として磁性シートに求められる特性は、交流磁場における透磁率 $\mu = \mu' + j\mu''$ (j は虚数単位) で表され

る、高い透磁率の実部 μ' かつ低い損失項 μ'' である²⁾。これによって電磁波の収束効果を高め、通信距離を改善することができる。その他、使用用途によっては、磁性シートの要求特性として、耐食性やシート製造時の成形性等が求められる。

特に磁性粉末の耐食性という観点から、磁性シート⁴⁾、磁気テープ用鉄粉⁵⁾、圧粉コア⁶⁾等の様々な研究・開発がされてきた。樹脂と混練し成形する場合、バインダーによる耐食性改善も不可欠であるが⁶⁾、磁性粉末自体の耐食性を向上させることも、使用するバインダーの自由度を高くし、様々な使用環境に適用する上で重要であると考えられる。

そこで本研究では、磁性粉末の耐食性向上を目的として、ガスアトマイズ法で作製された球状のFe-Cr-Si合金粉末における、耐食性および磁気特性に及ぼす添加元素の影響を評価した。この評価において、耐食性と磁気特性の balan

*1 粉末事業部 粉末技術部 技術3グループ

*2 粉末事業部 粉末技術部 技術3グループ長、博士 (工学)

スに優れた組成の球状粉末を選択し、扁平化を行なった。作製した扁平粉末について、耐食性および磁気特性を評価し、さらに、磁性シートを作製し、透磁率の周波数特性も合わせて評価したので報告する。

2. 添加元素の選定

2.1 実験方法

ベース合金として、高い耐食性および磁気特性を有するフェライト系ステンレス鋼を参考に開発したFe-15%Cr-5%Si（以下%は、mass%を示す）を選択した。この合金は、高いCr含有量により耐食性を高め、Siを含有させることで低保磁力、かつFe-Si-Al合金よりも高い飽和磁化を実現し、前述したRFID用途など10MHz近傍に使用される磁性粉末への利用が期待される。

球状粉末は、窒素ガスアトマイズによって作製した。検討組成をTable 1に示す。Fe-15%Cr-5%Siをベースとして、主にフェライト系ステンレス鋼の耐食性向上元素を参考に⁷⁾、Si、Al、Ni、Cu、Moを添加元素として選択した。本実験では、添加による飽和磁化の減少を抑えるため、Crに対してそれぞれ2%置換添加した。また、Ni添加量の影響を調査するため、Ni量2、4、6%の計3水準を作製した。作製した粉末を所定の粒度に分級し、下記の実験評価を行なった。なお、以下では各組成を添加量と添加元素の種類に従い、「2Ni」のように示す。

Table 1 Chemical compositions of spherical powders of Fe-Cr-Si alloy in mass%.

	Fe	Cr	Si	Al	Ni	Cu	Mo
Base	Bal.	15.06	4.94	-	-	-	-
2Si	Bal.	12.94	6.94	-	-	-	-
2Al	Bal.	12.96	4.94	1.91	-	-	-
2Ni	Bal.	13.00	4.86	-	1.94	-	-
4Ni	Bal.	11.01	5.06	-	4.03	-	-
6Ni	Bal.	9.01	5.01	-	6.07	-	-
2Cu	Bal.	13.06	4.85	-	-	2.00	-
2Mo	Bal.	13.08	4.83	-	-	-	2.04

耐食性評価として、各種酸溶液に粉末を浸漬した際の溶出量を定量する溶出試験を行なった。腐食挙動は、粉末粒度の影響を受けるため⁹⁾、75~106 μ mに分級して試験を行なった。酸溶液は、10%硝酸、10%硫酸、10%塩酸を使用した。粉末を1 \pm 0.05g秤量し、20 $^{\circ}$ Cの各種酸溶液10mlに60分間浸漬させた。その溶液を25mlに定容し、Fe、Cr、Siイオンの溶出量をICP分析にて測定した。

その他評価として、106 μ m以下に分級した粉末を用いて、磁気特性評価および粉末の断面観察を行なった。保磁力は未熱処理粉末および粉末の焼結温度を考慮し、Ar雰囲気873Kおよび1073Kで熱処理した粉末についてHc

メータ（Qumano HC-801）を用いて測定した。飽和磁化は、未熱処理粉末についてVSM（振動試料型磁力計）を用いて、印加磁場1.2 \times 10³kA/mにて測定した。断面観察は、粉末を樹脂に埋め込み、研磨した後、光学顕微鏡およびSEM（走査型電子顕微鏡）を用いて行なった。なお、腐食液は、硝酸15ml、塩酸100ml、水100mlの混合液にノニオン界面活性剤3mlを添加した溶液を使用した。

2.2 結果および考察

2.2.1 溶出試験結果

Fig.1に各球状粉末の各種酸溶液に対するFe、Cr、Siイオンの合計溶出量を示す。硝酸に対する溶出量は、硫酸および塩酸と比較し、60ppm以下と著しく小さく、高い耐食性を有していた。Crに対するNi置換量の増加にともない、硝酸への溶出量はわずかに増加した。

硫酸に対する溶出量は、Al添加では変化なく、Si、Ni、Cu、Moを添加することで減少した。その効果はMo>Cu>Ni>Siの順に高い。また、Ni量の増加にともない、硫酸に対する溶出量は減少するが、MoおよびCu添加には及ばなかった。

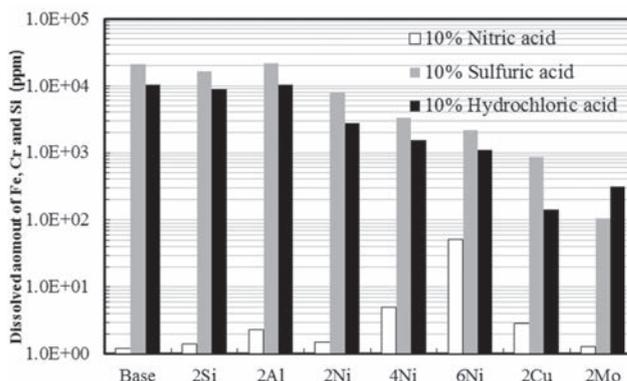


Fig.1 Results of dissolution test at 293K of spherical powders of Fe-Cr-Si alloy before annealing.

塩酸に対する溶出量は、Al添加では顕著な変化はないが、Si、Ni、Cu、Moを添加することで減少した。その効果はCu>Mo>Ni>Siの順に高い。また、Ni量の増加にともない塩酸への溶出量は減少するが、硫酸に対する挙動と同様に、MoおよびCu添加には及ばなかった。

フェライト系ステンレス鋼はCrを多く含有することから、硝酸のような酸化性の酸には優れた耐食性を示すが、非酸化性の硫酸や塩酸には弱い⁹⁾。硝酸に対する耐食性は、Cr量の増加にともない高まることから⁷⁾、Fig.1における、NiのCrに対する置換添加量の増加にともなう、硝酸に対する溶出量のわずかな増加は妥当といえる。一方、バルク材では硫酸、塩酸などの非酸化性の酸に対して、Ni、Cu、Moが有効であることが知られており⁷⁾、Fig.1の結果から、金属球状粉末においても、その有効性が認められた。なお、

Niなどの元素に比べ効果は小さいが、Si添加により、硫酸に対する溶出量が減少した。これは、ステンレス鋼にSiを多量添加することで硫酸に対する耐食性が向上することが知られており¹⁰⁾、本合金でも2%と添加量は少ないが、その効果がわずかに現れていると考えられる。

2.2.2 磁気測定結果

Fig.2に各球状粉末の未熱処理および熱処理後の保磁力の測定結果を示す。未熱処理粉末においては、添加元素による保磁力への影響は小さかった。

これに対して、熱処理を加えるとその挙動は大きく変化した。873K熱処理を加えると、2Si、2Al、2Ni、4Ni、6Niは、熱処理によって各未熱処理粉末よりも保磁力が減少した。それらの値は、概ねBaseと同等を示した。一方、2Cuおよび2Moでは、著しく保磁力は増加し、特に2Moの保磁力は、未熱処理粉末の2.9倍まで増加した。1073K熱処理を加えると、6Ni、2Mo以外のすべての試料において、未熱処理粉末よりも保磁力は減少した。2Siおよび2Alは、Baseよりも低い保磁力を有し、それ以外の試料は、Baseよりも保磁力が高かった。Ni添加量による影響として、4%までは比較的保磁力は小さいが、6Niにおいて著しく増加した。

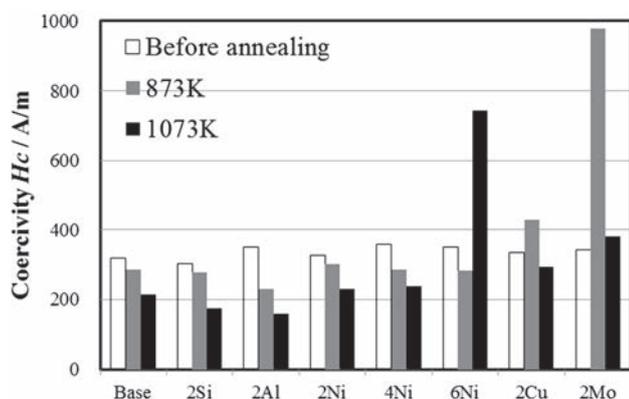


Fig.2 Coercivity of spherical powders of Fe-Cr-Si alloy before and after annealing.

Fig.3に未熱処理の各球状粉末における飽和磁化の測定結果を示す。飽和磁化はNi量の増加にともない増加した。一方で、2Siおよび2Alの飽和磁化は減少し、2Cuおよび2MoはBaseと同等の値を有していた。飽和磁化の挙動は、本実験では各添加元素をCrに対して置換添加しているため、Cr量の減少にともない飽和磁化の増加と¹¹⁾、添加元素による飽和磁化の変化が重畳していると推測される。Ni量の増加にともない飽和磁化の増加は、Feに対してNiを2~6%添加しても変化が小さいことから¹²⁾、Cr量の減少にともない飽和磁化の増加¹¹⁾が大きく寄与していると推測される。2Siおよび2Alの飽和磁化の減少は、Cr量の減少にともない飽和磁化の増加に対して¹¹⁾、Si¹³⁾ およびAl¹⁴⁾ の添

加による飽和磁化の減少が大きいためと考えられる。一方、CuおよびMoはFeに置換固溶し、飽和磁化は減少すると考えられるが、Cr量の減少にともない飽和磁化の増加によって相殺されると考えられる。

6Ni、2Cuおよび2Moの熱処理による保磁力変化を考察するため、球状粉末のSEMおよび光学顕微鏡観察結果をFig.4 (a) ~ (o) に示す。Baseは、熱処理によって第2相の析出は見られなかったが ((a) ~ (c))、2Cuおよび2Moにおいて、結晶粒界および粒内に析出物が観察された ((f)、(i))。EDS分析の結果、それぞれCuまたはMoリッチの析出物であることがわかった。このことから、球状粉末の磁化過程が主に磁壁の移動によるものと仮定すると、2Cuおよび2Moにおける保磁力の増加は、析出物による磁壁のピンニング作用であると推測される¹⁵⁾。しかし、最も保磁力が増加した873K熱処理材において、その析出物は確認できなかった ((e)、(h))。これはSEMでは観察できない微小サイズの析出物が寄与したものと考えられ、そのサイズが磁壁の厚さに近いことで著しく保磁力が増加したと推測される¹⁵⁾。

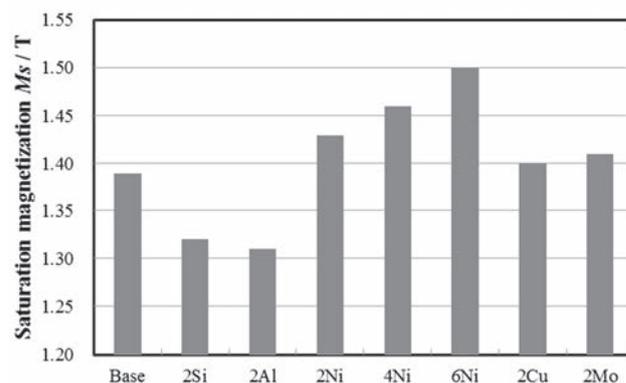


Fig.3 Saturation magnetization of spherical powders of Fe-Cr-Si alloy before annealing.

また、Fig.4 (j) ~ (l) に示すように、SEM観察では、6Niに析出物等の第2相は観察されなかった。しかし、(o) に示すように、エッチングした試料の光学顕微鏡観察によって、マルテンサイト (α') と考えられる相が観察された。923KにおけるFe-Cr-Niの3元状態図より¹⁶⁾、Siの影響を考慮しても、Fe-9%Cr-6%Niは $\alpha + \gamma$ の2相領域と推測され、6Ni球状粉末 (Fe-9%Cr-5%Si-6%Ni) にも熱処理中に γ 相が生成し、それが冷却中にマルテンサイト変態を生じたと考えられる。 α' は強磁性体であるが、多くの内部欠陥を有することから¹⁷⁾、1073K熱処理した6Niの保磁力が著しく増加したと考えられる。また、(m) ~ (o) に示すように、未熱処理粉末において観察された微細なデンドライトは、熱処理によって消滅した。このデンドライトの消滅は、熱処理による保磁力減少の主な原因であると考えられ、すべての球状粉末において観察された。

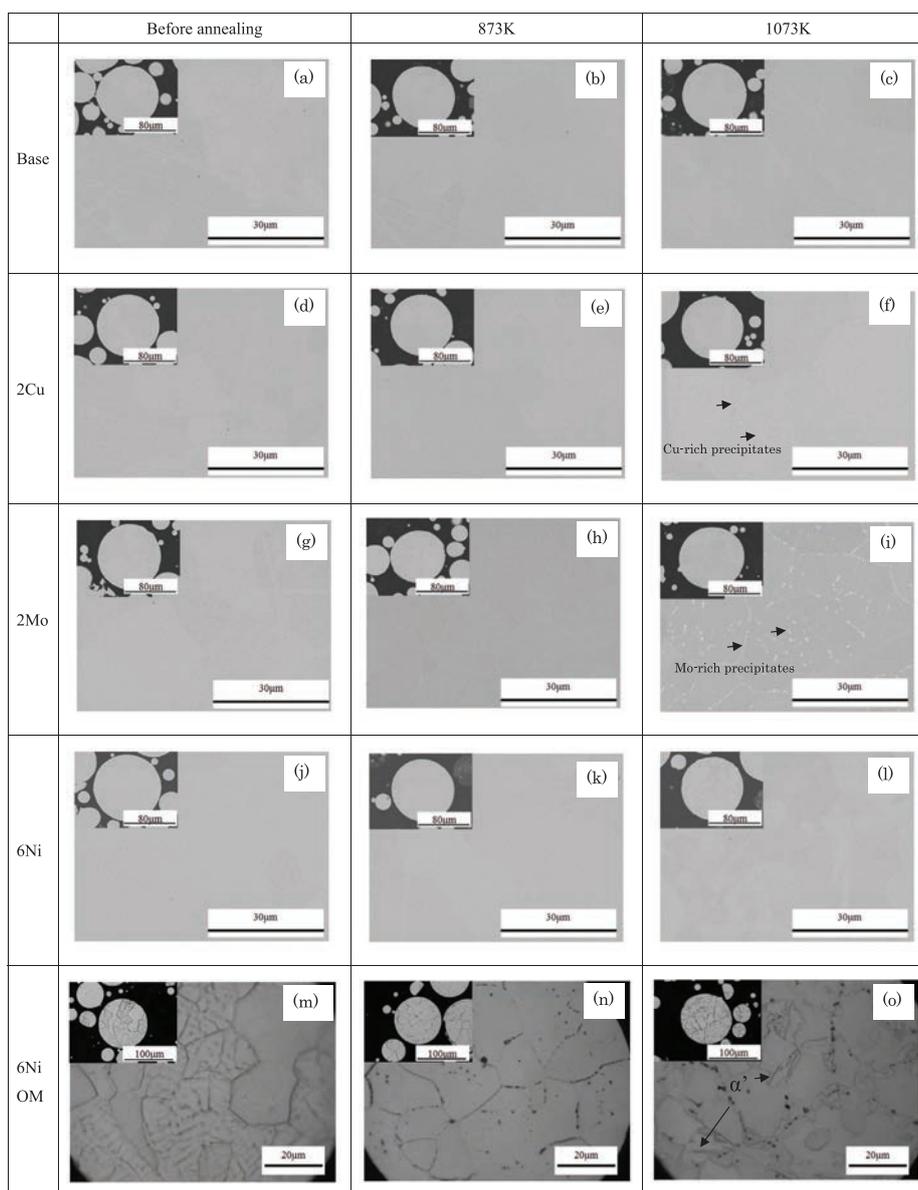


Fig.4 Cross-sectional back scattered electron images (a) ~ (l) and optical micrographs (OM) (m) ~ (o) of spherical powders of Fe-Cr-Si alloy; the upper left insets are full view of observed powders.

以上の結果から、Al、Si、Ni、Cu、Moの耐食性および磁気特性に及ぼす影響が明らかになった。この結果をもとに、耐食性の向上かつ磁気特性の維持に寄与する元素として、耐食性および磁気特性のバランスの良いNi、析出物の保磁力への影響がMoよりも小さいCuを選択し、これら球状粉末を原料に扁平加工を行い、作製した扁平粉末の特性評価を行なった。

3. 扁平粉末の評価

3.1 実験方法

Table 1で作製した球状粉末Base、2Ni、4Ni、6Ni、2Cuの計5試料を所定の粒度に分類し、扁平加工の原料粉末として加工した。扁平加工は、Fig.5に示す一般的なア

トリツションミルを使用し、原料粉末、溶媒、加工ボールを攪拌して行なった。得られた扁平粉末について、レーザー回折・散乱法により平均粒子径およびタップ密度をそれぞれ測定し、Table 2にまとめて示した。得られた扁平粉末には、Ar雰囲気中で1073Kの熱処理を施した。

この熱処理した扁平粉末の溶出試験を行なった。酸溶液は、球状粉末の評価と同様に10%硝酸、10%硫酸、10%塩酸を使用した。粉末を0.02±0.001g秤量し、20℃の各種酸溶液10mlに60分間浸漬させた。その溶液を25mlに定容し、Fe、Cr、Siイオンの溶出量をICP分析にて測定した。

保磁力および飽和磁化の測定は、球状粉末と同様にHcメータおよびVSMを用いて測定した。また、扁平粉末と樹脂を混練してスラリーを作製し、ドクターブレード法により、シート状に成形した。その磁性シートを333K、

50MPaでプレスした。このようにして作製した磁性シートについて、インピーダンスアナライザ (Keysight E4991B) による1MHz ~ 1GHz域の複素透磁率の周波数特性評価を行なった。

構成相の同定には、X線回折装置 (ターゲット Cu-K α 線) を用いて測定した。

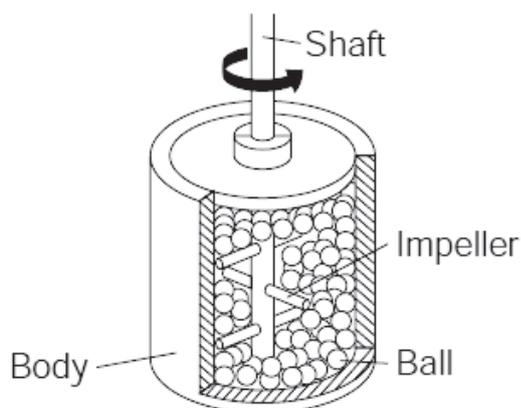


Fig.5 Schematic diagram of attrition mill.

Table 2 Average particle size and tap density of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing.

	Ave. particle size(μm)	Tap density (Mg/m^3)
Base	165	0.69
2Ni	175	0.78
4Ni	150	0.80
6Ni	167	0.89
2Cu	173	0.73

3.2 結果および考察

3.2.1 溶出試験結果

Fig.6に各扁平粉末の各種酸溶液に対するFe、Cr、Siイオンの合計溶出量を示す。球状粉末の結果と同様に、硝酸に対する溶出量は、硫酸および塩酸と比較し著しく小さく、扁平加工後においても高い耐食性を有していた。

硫酸に対する溶出量は、Ni量の増加にともない減少した後、その効果は4%で飽和した。また、球状粉末の結果と同様に、Cu添加によっても、硫酸に対する溶出量は減少し、Baseの溶出量の40%以下にまで減少した。

塩酸に対する溶出量は、Ni添加によって減少した後、その効果は2%で飽和した。また、球状粉末の結果と同様に、Cu添加によっても、塩酸に対する溶出量は著しく減少し、Baseの溶出量の9%以下にまで減少した。

以上の結果より、概ね球状粉末の結果と同様に、扁平粉末においてもNiおよびCu添加によって、非酸化性の酸に対する耐食性が大きく向上することがわかった。

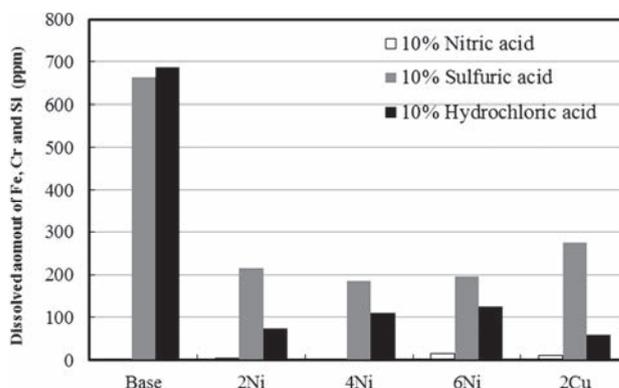


Fig.6 Results of dissolution test at 293K of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing.

3.2.2 磁気測定結果

Fig.7に熱処理した各扁平粉末の保磁力の測定結果を示す。4%までのNi添加は、保磁力を増加させないことがわかった。これに対して、6Niおよび2Cuの保磁力は著しく高い傾向にあった。これらは、概ね球状粉末の挙動と同様であった。

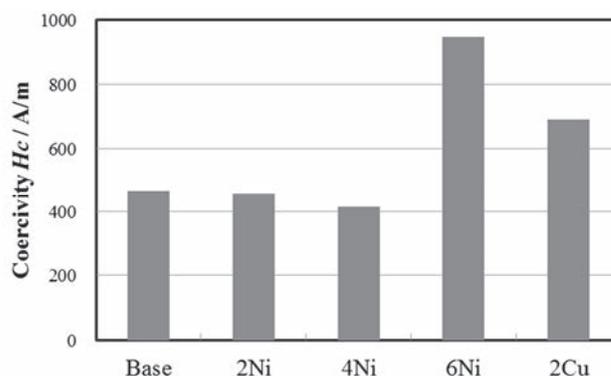


Fig.7 Coercivity of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing.

Fig.8に熱処理した各扁平粉末の飽和磁化の測定結果を示す。球状粉末の結果と同様に、Ni量の増加にともない飽和磁化は増加するが、6%では反対に減少した。球状粉末の結果と同様に、2CuはBaseと同等の飽和磁化を有していた。

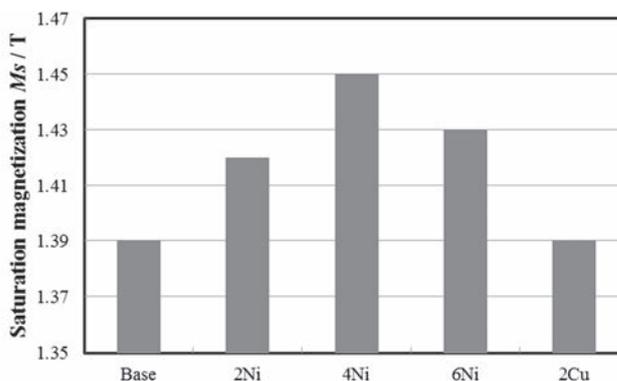


Fig.8 Saturation magnetization of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing.

Fig.9に扁平粉末と樹脂を混練して作製した磁性シートの1MHz~1GHzにおける透磁率の周波数特性を示す。全体的な μ' の周波数依存性は、試料間に大きな差異は見られないが、 μ' の絶対値に、8~30と大きな差異が現れた。一方、 μ'' は概ね10MHz前後で立ち上がり、絶対値の傾向は、 μ' と同様であった。

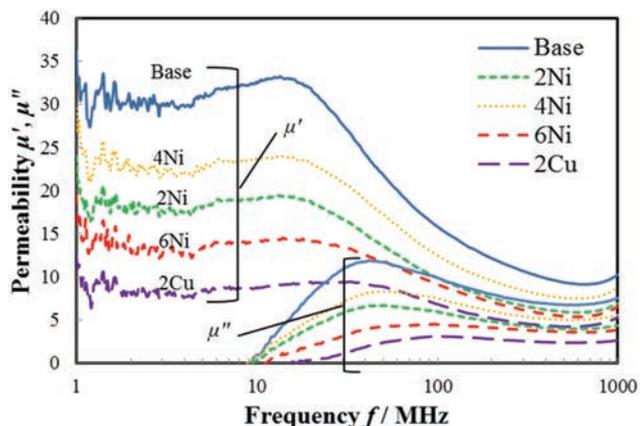


Fig.9 Frequency dependence of complex permeability μ' and μ'' of magnetic sheet including tested flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing. μ' and μ'' denote real and imaginary part of complex permeability, respectively.

3.2.3 6Niの飽和磁化の挙動

6Niにおいて、飽和磁化が減少した (Fig.8) 原因を調査するため、XRD測定による扁平粉末の構成相の同定を行なった。Fig.10に各Ni量試料のX線回折パターンを示す。4%Niまでは α Fe単相であったのに対し、6Niの扁平粉末においては、球状粉末に認められなかった γ Feピークが観測された。したがって、6Ni扁平粉末における飽和磁化の減少は、非磁性の γ 相の形成によるものと考えられる。

このように6Ni扁平粉末では、1073K熱処理によって、 γ 相が形成したのに対し、6Ni球状粉末において、 α' 相が観察された。この理由については、詳細は不明だが、以下の2つの理由が予想される。

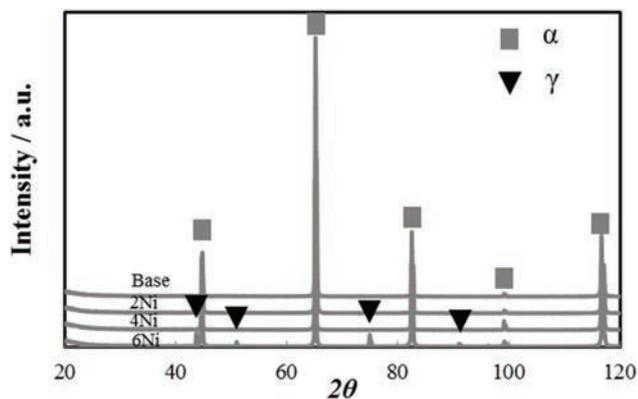


Fig.10 X-ray diffraction patterns of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy after annealing.

Fe-Si-Al系粉末を扁平加工した吉田らの実験によって、粉末に酸化が生じ、酸素との親和性の高いSiおよびAlが表面に濃化する現象が報告されている¹⁸⁾。この現象がCrおよびSiを含有している本合金系でも生じたと推測される。酸素との親和性が高く、 α フォーマー元素でもあるCrおよびSiが表面に濃化し、粉末内部で γ フォーマー元素のNi濃度が高まることで、 γ 相が安定化し、熱処理後の γ 相体積分率が増加した可能性がある。また、扁平加工により生じる多くの内部欠陥によって、熱処理中の拡散が促進され、球状粉末よりも平衡状態に近い安定な γ 相が形成し、それが冷却後も多く残存したことが推測される。

3.2.4 μ' の差異について

μ' の絶対値に大きな差異が現れたことについて考察するため、作製した磁性シートの飽和磁化を測定した。扁平粉末の飽和磁化を100%とし、測定した磁性シートの飽和磁化との比率を扁平粉末の体積充填率として算出した。さらに、磁性シートの μ' は、磁性シート中の扁平粉末の充填率P、材料固有の透磁率 μ_t 、粉末の形状に起因する反磁界係数N¹⁹⁾ (式 (1)) および式 (2) に示すOllendorffの式を用いて導出できる²⁰⁾。

$$N = \frac{1}{2} \left[\left\{ \frac{m^2}{(m^2-1)^{3/2}} \right\} \left\{ \sin^{-1} \left\{ \frac{(m^2-1)^{1/2}}{m} \right\} - \left\{ \frac{1}{(m^2-1)} \right\} \right\} \right] \quad (1)$$

$$\mu' = \left[\left\{ \frac{P(\mu_t-1)}{\{N(1-P)(\mu_t-1)+1\}} \right\} \right] + 1 \quad (2)$$

ここで、式 (1) のmは粉末粒子の形状が扁平回転楕円体である場合、粒子径と厚さの比として定義されるアスペクト比を表す。この2式を用いて、作製された磁性シートの μ' を計算し、10MHzにおける μ' の実測値と比較した。計算には、m=60、磁性シートの飽和磁化から算出した磁性粉末の充填率および扁平粉末の保磁力から見積もった μ_t を用いた²¹⁾。

Fig.11に、10MHzにおける μ' の実測値および式 (2) を用いた計算値と扁平粉末の充填率の相関を示す。Base、2Ni、4Niの10MHzにおける μ' の実測値は、曲線で示す保磁力450 A/m (Base、2Ni、4Niに保磁力に相当) の計算値とよく一致した。したがって、これら3試料の μ' の差異は、扁平粉末の充填率の違いであると考えられる。一方、6Niおよび2Cuの μ' は、曲線より小さい値であることから、保磁力の差異によるものと考えられる。したがって、扁平粉末の充填率を考慮すれば、保磁力の観点より、2Niおよび4Niの実質的な μ' は、Baseと同等のものであると予測される。なお、このように磁性シートの充填率にばらつきが現れた理由について、扁平粉末の粉体特性や樹脂との濡れ性等の差異によるものと考えられるが、さらなる調査

が必要である。

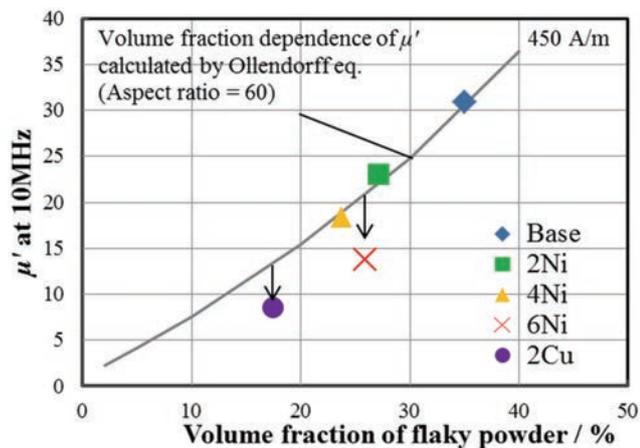


Fig. 11 Relationship between measured μ' and volume fraction of flaky powders of Fe-Cr-Si alloy in magnetic sheet. Solid line was calculated from aspect ratio and estimated permeability using Ollendorff equation.

4. 結言

Fe-Cr-Si合金粉末における耐食性向上を目的として、各添加元素の耐食性および磁気特性への影響を調査した。また、作製した球状粉末を原料に扁平化を行ない、作製された扁平粉末およびこれを用いた磁性シートの磁気特性も合わせて評価し、以下の知見を得た。

- 球状粉末の耐食性は、添加元素によらず、硝酸に対して極めて優れていた。また、硫酸および塩酸に対する耐食性向上に、Si、Ni、Cu、Mo添加が有効であることがわかった。
- 球状粉末の磁気特性の挙動は、添加元素によって大きく異なった。SiおよびAl添加は保磁力および飽和磁化を減少させた。4%までのNi添加は、保磁力を低く維持し、飽和磁化を増加させた。2Cuおよび2Moは、熱処理を加えることで、保磁力を増加させた。これは、熱処理によってCuまたはMoリッチの微小析出物が形成し、それら析出物が磁壁のピンニングサイトとなり、保磁力を増加させたと考えられる。
- 扁平粉末の耐食性は、球状粉末と同様に、硝酸に対して極めて優れていた。また、NiおよびCu添加は、硫酸および塩酸に対する耐食性を大きく向上させた。
- 扁平粉末の磁気特性の挙動は、ほぼ球状粉末と同様の傾向であった。しかし、球状粉末と異なり、6Ni扁平粉において、非磁性の γ 相が形成し、飽和磁化が減少した。これは扁平加工により生じる酸化現象ま

たは内部欠陥の観点から、熱処理中に安定した γ 相が形成し、それが冷却後も多く残存した可能性が考えられる。

- 扁平粉末を用いて作製した磁性シートの透磁率の周波数特性を評価した結果、 μ' の絶対値に大きな差異が現れた。この差異について、Ollendorffの式を用いて考察した結果、磁性シートに含有される扁平粉末の充填率の差異と保磁力の観点から整理することができた。扁平粉末の充填率を考慮すれば、保磁力の観点より、2Niおよび4Niの実質的な μ' は、Baseと同等のものであると予測される。したがって、耐食性の向上かつ磁気特性の維持に寄与する元素としてNiが有効であることがわかった。 γ 相の形成を考慮すれば、その添加量は4%までの添加が望ましいと考えられる。

参考文献

- 橋本修：電波吸収体の技術と応用，シーエムシー出版，(2004)，132-142.
- 及川義則，亀井浩二：NEC技報，59 (2006) 2，96-99.
- 坂下忍：Interface，(2004) 12，84-92.
- 栢武志：繊維と工業，67 (2011) 6，157-159.
- 北折典之，篠田正義，徳増佐知子，大河原英生：太陽誘電技報，6 (1990)，17-21.
- 砂田聡，伊井雅一，森本耕一郎，真島一彦：粉体および粉末冶金，54 (2006) 6，432-438.
- 遅沢浩一郎：ステンレス鋼，日本鉄鋼協会，(2000)，30-47.
- Y. Y. Guo, j. Zhang, K. F. Li, W. B. Xia, K. Han, C. J. Song, and Q. J. X. Zhai: Corros. Eng. Sci. Techn, 48 (2013) 3, 230-233.
- 小若正倫：材料，23 (1974) 254，36-47.
- 江原隆一郎，山田義和，中村誠，長野肇，平井龍至：三菱重工技報，32 (1995) 3，211-214.
- R. Bozorth: *Ferromagnetism*, D. Van Nostrand Company, New York, (1951), 151.
- 若生敏夫：日本応用磁気学会，3 (1979) 1，12-16.
- R. Bozorth: op. cit., 77.
- Ibid.*, 216.
- 金子秀夫，本間基文：磁性材料，日本金属学会，(1997)，101-102.
- G. R. Speich: *Metals Handbook*, ASM 8th ed. Metals Park, Ohio, 8 (1973), 424-426.

- 17) 西山善次：マルテンサイト変態 基本編，丸善，(1971)，7-8
- 18) 吉田栄吉，佐藤光晴，菅原英州，島田寛：日本金属学会誌，63 (1999) 2，237-242.
- 19) 太田恵造：磁気工学の基礎 I，共立全書，(1973)，35.
- 20) von F. Ollendorff: *Magnetostatik der Massekerne*, archiv für Elektrotechnik. XXV Band, (1931).
- 21) 近角聡信：強磁性体の物理 (上)，裳華房，(1978)，32.

■ 著者



三浦 滉大



澤田 俊之