

100MHz帯インダクタ用Fe-C-Cr系扁平粉末の開発

Development of Fe-C-Cr Flaky Powders for 100MHz Band Inductors

細見 凌平^{*1} 三浦 滉大^{*2} 澤田 俊之^{*3}

HOSOMI Ryohei, MIURA Kodai, SAWADA Toshiyuki

Synopsis: As operating frequencies of electronic devices continue to increase, inductors need to show stable magnetic performance at high frequencies. In this study, Fe-C-Cr flaky powders were investigated as core materials for inductors operating in the 100MHz frequency band. Fe-C-Cr alloy powders with different C and Cr contents were prepared by a gas atomizing process. The powders were flattened using an attrition mill. The effects of C and Cr additions on magnetic properties were examined.

For the flaky powders, micro strain ε and coercivity H_C were evaluated. X-ray diffraction showed that ε increased with increasing C and Cr contents. This increase in ε was caused by lattice strain from solid solution carbon and deformation during the flattening process. H_C also increased with increasing ε . This result shows that changes in microstructure enhanced pinning of domain wall motion. In the high Cr composition, M_7C_3 carbides were observed, and their presence further modified the domain wall behavior.

The frequency characteristics were evaluated focusing on the domain wall resonance frequency f_r . A correlation was found between f_r and $Ms/\mu_t^{1/2}$. This result indicates that a higher f_r corresponds to a larger domain wall volume $S_w\delta$. Compositions mainly consisting of deformation induced martensite showed higher f_r . This suggests that deformation induced martensite is effective for increasing the $S_w\delta$. In the 1.6C-13Cr composition, deformation induced martensite coexisted with M_7C_3 carbides. This coexistence may promote domain wall formation and lead to the highest f_r . These results show that control of microstructure is important for improving the high frequency performance of Fe-C-Cr flaky powders for 100MHz band inductors.

Keywords: magnetic powder; magnetic sheet; flaky powder; high frequency inductors; micro strain; coercivity; resonance frequency; domain wall volume; crystallite size.

1. 緒言

近年、スマートフォンやウェアラブル機器、自動車の電装化、さらには5G/次世代通信技術の普及に伴い、電子機器は一層の高機能化・小型化が進んでいる。これらの電子機器においては、電流変動の抑制およびエネルギーの一時的な蓄積を担う多数のインダクタが不可欠であり、これらに求められる動作周波数帯は近年ますます高周波化している¹⁾。特に100MHz付近の周波数帯は、高性能センサやノイズフィルタ回路など多様な用途で利用される領域であり、この帯域で安定して動作できるインダクタの需要は今後も拡大すると見込まれる。

インダクタの性能は、内部に組み込まれる磁性コアの特

性に大きく依存する。磁性コアは、磁束を効率よく通すことでインダクタンスを高め、電子回路の安定動作に寄与する重要な部材である。従来、この磁性コアにはフェライト材料が広く用いられてきた。フェライトは電気抵抗が高く、数MHz程度までの周波数域では損失が小さいことから、電源回路やフィルタ回路など多くの用途でインダクタの小型化および安定動作に大きく貢献してきた。

しかしながら、電子機器の高周波化に伴い、インダクタに求められる動作周波数が100MHz近傍へと拡大するにつれて、フェライト材料の限界が顕在化している。フェライトは飽和磁化 M_s が低いため、大電流条件下では磁気飽和に至りやすい。また高周波領域では材料内部の磁化が急激な変化に追随しにくくなり、その結果として電磁エネル

*1 粉末事業部 粉末技術部 技術3グループ

*2 研究・開発センター 新商品開発室 商品開発2グループ

*3 研究・開発センター ゼネラルマネージャー 博士(工学)

ギーの一部が熱として失われる磁気損失が増大する。特に100MHz付近ではこの磁気損失が避けられず、コアとして十分な能力を維持できなくなるだけでなく、効率低下や発熱の問題も生じる。このように、フェライトは低～中周波域において優れた材料であるものの、100MHz帯のような高周波領域では十分な性能を発揮できず、インダクタのさらなる高機能化に寄与するための新たな磁性材料の開発が求められている。

このような背景から、本研究では高い M_s を有する金属磁性材料に着目した。一方で、高周波領域では磁性材料内部に渦電流が発生し、磁気損失が増大することが知られている。そこで、渦電流の抑制を狙いとして粉末形状を扁平化した磁性粉末を検討した。本研究では100MHz帯インダクタの高機能化に寄与する扁平粉末の開発を目的とし、アトリションミルを用いて原料粉末を加工したFe基合金扁平粉末を作製した。得られた扁平粉末について保磁力 H_c および M_s を評価するとともに、磁性シートを作製し、透磁率の周波数特性に及ぼす添加元素量の影響について検討した。

2. 実験組成の検討

100MHz帯で使用されるインダクタの性能を向上させるためには、インダクタンス L を大きくする必要がある。 L が大きいほど、電流変動をより効果的に抑制でき、回路の安定性が高まる。そのため、高周波領域においても十分な L を確保することが、インダクタの高機能化に直結する。インダクタンス L は以下の式1で表される。

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (1)$$

ここで、 μ 、 N 、 S および l はそれぞれ透磁率、コイルの巻き数、コイルの面積およびコイルの長さを表す。 L を高めるには、コイル内部の磁性材料が高い μ を持つことが不可欠である。 μ の実部である実透磁率 μ' の高い材料は磁束を通しやすく、同じ体積でもより大きな L が得られる。これは、限られたスペースで十分な L を確保する必要があるインダクタにとって大きな利点であり、特に現代の電子機器において使用するインダクタが小型かつ高い L を有す

ることは重要である。

一方で、 μ' を単に高めるだけでは不十分であり、高い M_s を有する材料であることも重要である。 M_s が低い材料では大きな電流が流れた際に容易に飽和し、 L が急激に低下する。そのため、安定した磁気応答を維持するためには、高い M_s を持つ材料が不可欠であり、この点で金属磁性材料はフェライトに比べて有利である。

さらに高周波領域では磁性材料内部に渦電流が発生しやすく、これに伴う損失により虚透磁率 μ'' が増加する。渦電流によって μ'' が立ち上がると、結果として磁気損失を表す $\tan \delta$ ($=\mu''/\mu'$)が増大し、インダクタの発熱や効率低下の要因となる。そのため、インダクタの用途では、渦電流の影響を抑え、 μ'' を低く維持できる材料設計が重要であり、100MHz帯において $\tan \delta$ が小さい磁性材料が100MHz帯インダクタに適している。

このように、100MHz帯インダクタの高機能化に寄与するためには、高い μ' によって十分な L を確保できることに加え、大電流下でも飽和しにくい高い M_s を有し、さらに100MHzにおける $\tan \delta$ が小さい磁性材料が必要となる。本研究では、100MHz帯で使用するインダクタの高機能化に寄与するための磁性粉末材料を設計する観点から、粉末組成の選定を検討した。前報²⁾では、Fe-C-Cr系扁平粉末を対象として検討を行い、C、Cr量の変化により残留オーステナイト量やミクロひずみが変化し、その結果として磁壁の移動が制御され、磁壁共鳴周波数が高周波側へ移行することを明らかにした。また、高C組成においては結晶子サイズがより微細化し、高い磁壁共鳴周波数を示す組成が存在することを示した。本報では前報²⁾で扱ったFe-C-Cr-Si-Mn組成をベースに、さらにC、Cr量を増加した組成を検討した。

3. 実験方法

本研究で対象としたFe基合金扁平粉末の組成をTable 1に示す。C量については0.8、1.0、1.2、1.4、1.6mass%の5水準を設定した。Cr量は、C量が0.8～1.4mass%の組成では8mass%とし、C量が1.6mass%の組成に対しては8mass%および13mass%の2水準を設

Table 1 Chemical compositions of spherical powders of Fe-C-Cr alloy used as raw materials for flaky powders in mass%.

Alloy	Fe	C	Cr	Si	Mn
Fe-0.8C-8Cr	Bal.	0.77	7.99	0.94	0.49
Fe-1.0C-8Cr	Bal.	0.97	8.01	0.95	0.48
Fe-1.2C-8Cr	Bal.	1.17	8.01	0.90	0.49
Fe-1.4C-8Cr	Bal.	1.35	7.98	0.87	0.49
Fe-1.6C-8Cr	Bal.	1.53	7.99	0.93	0.50
Fe-1.6C-13Cr	Bal.	1.58	12.86	0.90	0.49

定した。いずれの組成においても、Siを1.0mass%、Mnを0.5mass%をそれぞれ添加した。原料粉末はガスアトマイズ法により作製し、 $-106\mu\text{m}$ に分級した。分級後の粉末は樹脂に埋め込み、研磨処理を施した上でピッカース硬さ試験を荷重0.98Nにて実施した。構成相の同定は、X線回折装置（ターゲット Cu-K α 線）を用いて測定した。また、保磁力 H_c および M_s はVSMを用いて測定した。

続いて、これらの球状粉末をアトリションミルにより湿式処理し、扁平状へ加工した。なお前報²⁾で作製した扁平粉末の平均粒子径（メジアン径 $D50$ ）は約10~100 μm であったが、過度に $D50$ が大きい、もしくは小さい扁平粉末は、シート作製時に扱いが困難であることから、量産的に扱いやすい30 μm の $D50$ を狙いとして扁平加工を実施した。加工後の扁平粉末は、レーザー回折・散乱法により $D50$ を求めるとともに、球状粉末の測定時と同様の手法で構成相、 H_c および M_s を評価した。なお扁平粉末の H_c は、粉末を圧縮充填した容器に対して、圧縮方向に垂直な磁場を印加して測定した。次に、扁平粉末を樹脂と混練スラリーを作製した。得られたスラリーはドクターブレード法によってシート状に成形し、333K、50MPaの条件で加圧し磁性シートを作製した。磁性シート中の扁平粉末の充填率は約30~36vol%であった。これらの磁性シートに対し、PMF-3000（凌和電子製）を用いて1MHz~1.8GHzの範囲で複素比透磁率（ μ' 、 μ'' ）を測定し、周波数特性を評価した。

ミクロひずみ ε の評価は、X線回折装置（ターゲット Cu-K α 線）を用いて測定した。 ε はDF（Direct fitting）

法³⁾により、 αFe の（110）、（200）、（211）、（220）、（310）の5本を用いて解析した。装置起因の幅広がりの影響は標準試料Siを用いて補正した。ここで ε は、Williamson-Hallプロットから得られる傾きのことである。本研究で用いた球状粉末および扁平粉末のマルテンサイト中のCは固溶していると考えられ、この固溶Cは回折ピークの幅広がりに影響すること⁴⁾から、本研究で取り扱う ε は固溶Cを含んだ値であることを考慮する必要がある。

4. 結果と考察

4.1 球状粉末の諸特性

Table 2に球状粉末の各特性の結果を示す。XRDの結果から、0.8C-8Cr組成はオーステナイトとマルテンサイトが確認されたが、1.6C-13Cr組成ではオーステナイトと M_7C_3 型炭化物の生成が確認され、その他4組成はオーステナイト単相であった。硬さはマルテンサイトを有する0.8C-8Cr組成が最も硬く、その他5組成はC、Cr量の増加に伴い硬さが増加した。これはC固溶量の増加、 M_7C_3 型炭化物の生成によるものと考えられる。 H_c や M_s においても、マルテンサイトを有する0.8C-8Cr組成では高 H_c かつ高 M_s となった一方、マルテンサイトが確認されなかったその他5組成では低 H_c かつ低 M_s であった。

4.2 扁平粉末の諸特性

Table 3に扁平粉末の各特性の結果を示す。なお磁壁共

Table 2 Characteristics of Fe-C-Cr spherical powders used as raw materials for flaky powders.

Alloy	Phase	Vickers hardness $HV_{0.1}$	Coercivity H_c (A/m)	Saturation magnetization M_s (T)
Fe-0.8C-8Cr	γ, α'	640	8000	0.63
Fe-1.0C-8Cr	γ	310	700	0.02
Fe-1.2C-8Cr	γ	340	400	0.01
Fe-1.4C-8Cr	γ	360	300	0.01
Fe-1.6C-8Cr	γ	400	300	0.01
Fe-1.6C-13Cr	γ, M_7C_3	430	500	0.01

Table 3 Characteristics of Fe-C-Cr flaky powders.

Alloy	Median diameter $D50$ (μm)	Phase	H_c (A/m)	M_s (T)	Magnetic loss $\tan\delta$ (at 100MHz)	Resonance frequency f_r (MHz)
Fe-0.8C-8Cr	32.4	α'	5200	1.60	0.061	408
Fe-1.0C-8Cr	30.7	α'	5400	1.55	0.059	416
Fe-1.2C-8Cr	31.8	α'	5500	1.48	0.063	511
Fe-1.4C-8Cr	30.9	α'	5900	1.40	0.055	678
Fe-1.6C-8Cr	31.4	α'	6400	1.32	0.045	865
Fe-1.6C-13Cr	29.9	α', M_7C_3	8000	1.17	0.030	1191

鳴周波数 f_r は後述するFig.2 (b)において、 μ'' がピークの値を取る周波数とした。 $D50$ は $30\mu\text{m}$ 狙いで作製した結果、いずれの組成も $D50$ は $30\mu\text{m}$ 前後の扁平粉末であることを確認した。XRDの結果から、1.6C-13Cr組成を除くすべての組成はマルテンサイト単相であったのに対し、1.6C-13Cr組成のみマルテンサイトに加えて M_7C_3 型炭化物の生成が確認された。 H_c はC、Cr量の増加に伴い上昇する傾向が認められた。一方、飽和磁化 M_s はC、Cr量の増加に伴い低下する傾向を示した。これは、マルテンサイト中への固溶C、Crの増加が M_s を低下させる⁵⁾ためであると考えられる。ガスアトマイズによる冷却過程で形成された本研究における球状粉末のオーステナイトは磁性が低く、一般に磁性コアに適さないが、アトリッションミル加工により加工誘起マルテンサイトとなることで高 M_s となる。更に加工誘起マルテンサイト特有の高転位密度により高い H_c を示すことで、ターゲットとする100MHz帯のような高周波インダクタへ適用可能とすることが本研究に

おける材料設計の狙いである。

Fig.1に扁平粉末の断面反射電子像を示す。前報²⁾の0.4C組成では厚みを持った扁平粉末も一部確認されたが、本研究で作製した扁平粉末はいずれの組成においても一様に扁平化されていた。いずれの扁平粉末も狙いの約 $30\mu\text{m}$ となっており、厚さも概ね同等であることが確認できた。したがって、各扁平粉末の形状因子は概ね同等と仮定し、磁性シートにおける透磁率特性には主に扁平粉末の材料パラメータ（磁気特性、結晶因子）の差異が影響すると考え、4.4章で考察する。

4.3 透磁率の周波数特性

Fig.2 (a)に各組成の扁平粉末により作製された磁性シートの μ' の周波数特性を示す。100MHzにおける μ' に着目すると、C、Cr量の増加に伴い、 μ' が低下する傾向が示された。なお、1.4C-8Cr組成と1.6C-8Cr組成の比較では、1.6C-8Cr組成の μ' がわずかに高い値を示してい

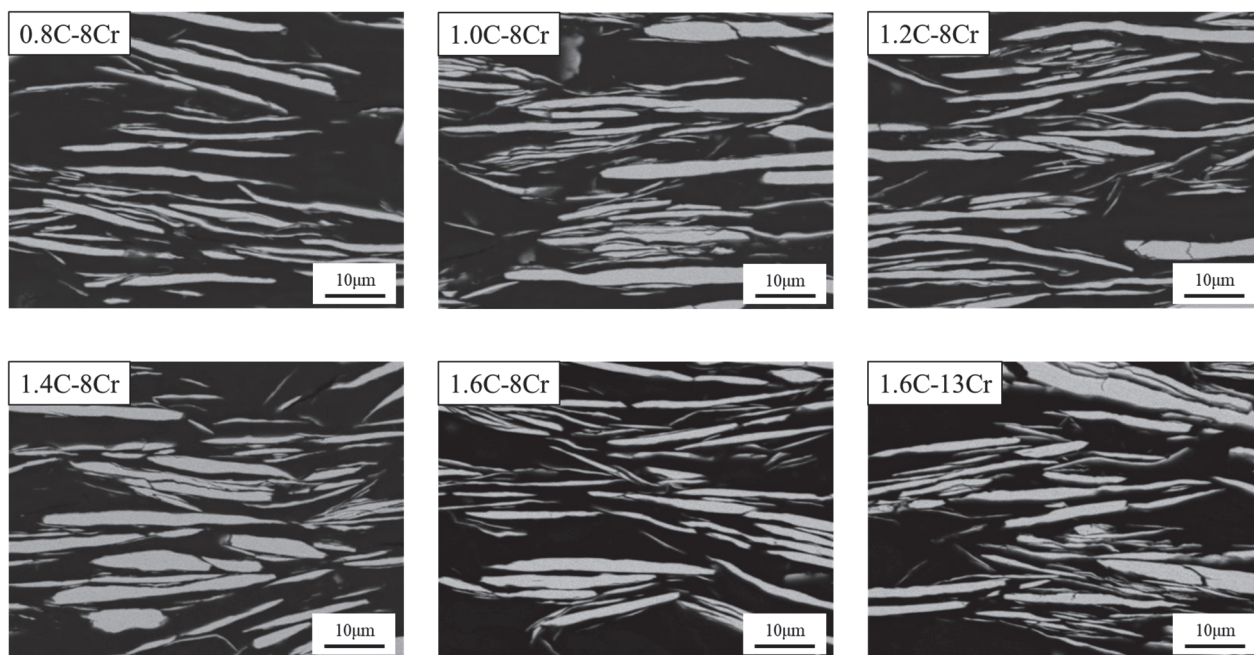


Fig. 1 Cross-sectional back scattered electron images of Fe-C-Cr flaky powders.

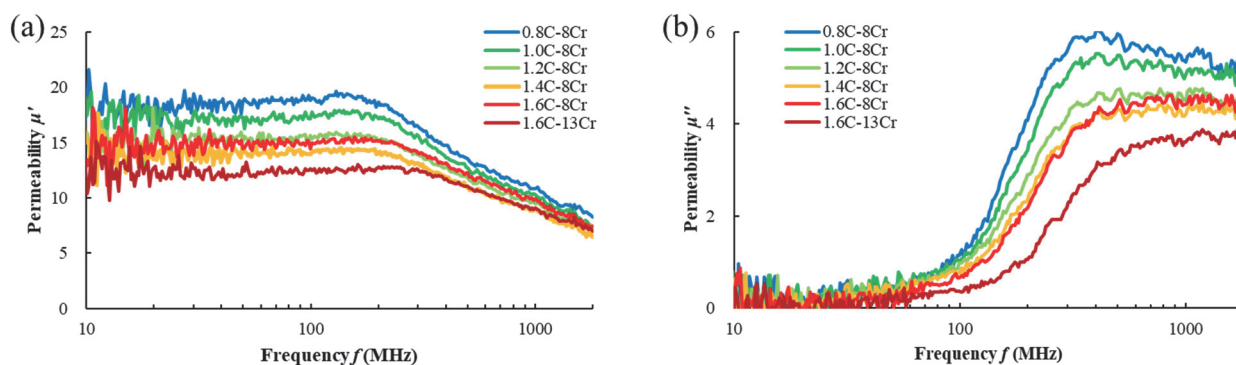


Fig. 2 Frequency dependences of (a) real part and (b) imaginary part of permeability of Fe-C-Cr flaky powders.

るが、これは磁性シート中の扁平粉末充填率のわずかな差異が要因であり、周波数特性への影響は小さいと考えられる。

Fig.2 (b) に各組成の扁平粉末により作製された磁性シート中の μ'' の周波数特性を示す。いずれの組成においても、10~100MHzの範囲で μ'' が緩やかに増加し始め、100MHzにおける μ'' はC、Cr量の増加に伴い低下する傾向が確認された。さらに高周波側では、すべての組成において μ'' のピークが現れた。このピークは磁壁共鳴に由来するものと考えられ、そのピーク周波数はC、Cr量の増加に伴って高周波側へシフトした。

Fig.3に各組成の扁平粉末により作製された磁性シートに対する $\tan \delta$ の周波数特性を示す。いずれの組成においても、10~100MHzの周波数領域において $\tan \delta$ は周波数とともに緩やかに増加した。100MHz近傍に着目すると、 $\tan \delta$ はC、Cr量の増加に伴い低下する傾向を示した。すなわち、低C、低Cr組成では $\tan \delta$ は比較的高い値を示すのに対し、高C、高Cr組成では100MHzにおける $\tan \delta$ が低下した。この傾向は、C、Cr量増加に伴う μ'' の低減の結果であり、100MHz帯の損失が高C、高Cr組成で抑制されていることを示している。したがって、本研究で作製した6種の扁平粉末のうち、100MHzにおいて最も $\tan \delta$ の小さい組成は1.6C-13Cr組成であった。

4.4 磁壁共鳴周波数と材料パラメータの関係

C、Cr量の変化が f_r に及ぼす影響を粉末の材料パラメータの観点から考察するため、はじめに各組成の扁平粉末の ε を評価した。 ε が変化する因子を調査するため、Fig. 4に ε と1.6C-13Crを除く各組成の母相中C固溶量との関係をプロットしたグラフを示す。なお、本研究ではガスアトマイズから扁平加工に至る工程においてCの拡散は生じないと仮定し、8Cr系組成においては分析C量を母相中に固溶したC量として扱っている。C量の増加に伴い ε が単調に増加する傾向が認められた。本研究で用いた ε は、転

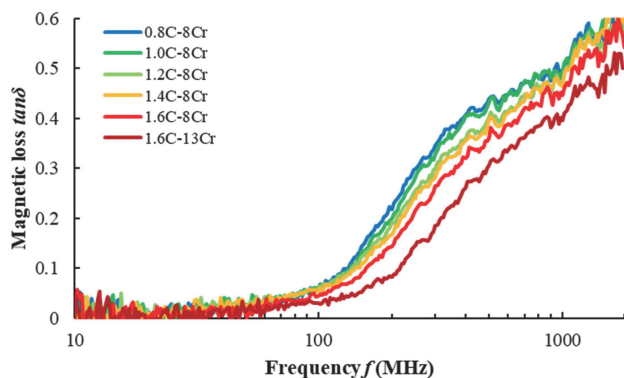


Fig. 3 Frequency dependences of magnetic loss $\tan \delta$ of Fe-C-Cr flaky powders.

位密度に加えて、マルテンサイト中に固溶した炭素による格子歪みの影響を含むパラメータである。そのため本結果は、固溶C量の増加に伴い加工歪みおよび格子歪みが蓄積したことを反映したものと考えられる。一方1.6C-8Cr組成より ε が大きい1.6C-13Cr組成では4.2節で述べたとおり、 M_{7C_3} 型炭化物が生成しており、他の8Cr系組成と組織状態が異なる。このような組織差が、扁平加工時に導入される歪の蓄積挙動に影響を及ぼした可能性があり、 ε が増大した一因と考えられる。

次に ε が扁平粉末の H_c に及ぼす影響をFig. 5に示す。加えて1.6C-13Cr組成を除く5組成のデータに基づいて算出した回帰線を示している。 ε の増加に伴い、 H_c が増加する傾向を確認した。 ε が大きくなることで、磁壁の移動が困難になり、その影響が H_c の増大として反映されたものと考えられる。一方、1.6C-13Cr組成については、マルテンサイトに加えて M_{7C_3} 型炭化物の生成が確認されている。そのため1.6C-13Cr組成では、 ε によるピン止め効果に加えて、 M_{7C_3} 型炭化物によるピン止め効果が重畳して働き、結果として他の組成よりも H_c がより高い値を示したと考えられる。以上より、 ε の増加は転位密度や格子歪みの増大を反映しており、その結果として磁壁移動が抑制され、 H_c が増大したと整理できる。すなわちC、Cr量の増加に伴い、扁平粉末中の磁壁に関する因子が変化していることが示された。このような変化は、静的磁気特性である H_c に反映されるだけでなく、磁壁の動的応答に起因する f_r にも影響を及ぼすと考えられる。そこで次に、磁壁に関する因子を用いて、 f_r の組成依存性について検討する。

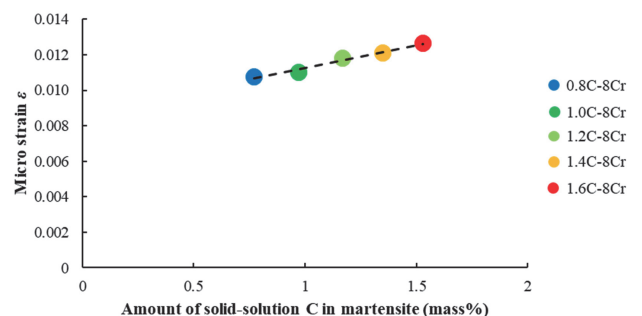


Fig. 4 Relationship between micro strain ε and the amount of solid-solution C in martensite.

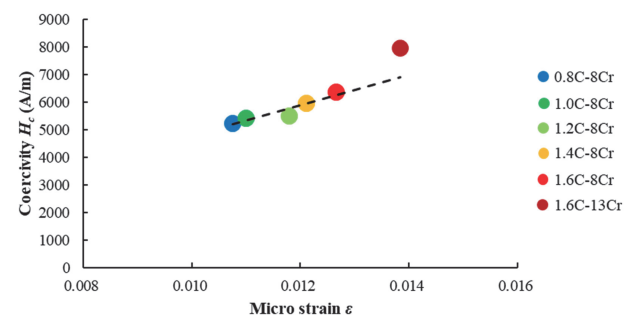


Fig. 5 Relationship between coercivity H_c and micro strain ε .

Fig. 6に f_r と $M_s/\mu_t^{1/2}$ の関係をプロットした結果を示す。扁平粉末の反磁界の影響を無視した μ_t は扁平粉末の真の透磁率を表し、扁平粉末の H_c から見積もった値である⁶⁾。なおFig. 6中には今回作製した6組成だけでなく、前報²⁾で作製した8組成の結果やFeおよびFe-Si系扁平粉末の結果⁷⁾もプロットしている。 f_r は以下の式2で表される⁸⁾。

$$f_r = 1.0 \times 10^4 M_s \sqrt{\frac{S_w \delta}{\chi_r}} \quad (2)$$

ここで、 S_w 、 δ および χ_r はそれぞれ磁壁の面積、磁壁の幅および比磁化率を表す。ただし、 $\chi_r = \mu_t - 1$ であるため、 $\mu_t \gg 1$ のときは $f_r \propto M_s/\mu_t^{1/2}$ の相関を持つ。Fig. 6より本研究において作製した6組成のC、Cr量の増加に伴う高 f_r 化は、磁壁体積 $S_w \delta$ が寄与していると考えられる。

前報²⁾までの組成および0.8C-8Cr組成では、球状粉末段階においてすでにマルテンサイトが生成していたことが確認されており、これらの組成では扁平加工後の組織は通常のマルテンサイトと加工誘起マルテンサイトの両方が存在している。一方、本研究で対象とした0.8C-8Cr組成を除く5組成では、球状粉末段階ではマルテンサイトは確認されておらず、扁平加工後のマルテンサイトは主として加工誘起マルテンサイトに由来すると整理できる。また、1.6C-13Cr組成では加工誘起マルテンサイトに加えて M_7C_3 型炭化物を含む組織が形成されている。したがって加工誘起マルテンサイトのみから構成される本研究の5組成では、前報²⁾までの通常マルテンサイトと加工誘起マルテンサイトからなる組織と比較して、 $S_w \delta$ の増大に対してより有利に働いている可能性が示唆される。さらに本研究で最も高 f_r の1.6C-13Cr組成では、加工誘起マルテンサイトに加えて M_7C_3 型炭化物が存在しており、これらの炭化物が磁壁生成サイトとして機能することで、 $S_w \delta$ のさらなる増大に寄与した可能性が考えられる。

Fig. 6においてC、Cr量の増加に伴う $S_w \delta$ の増大は、1.2C以上のC量を含む組成において特に顕著であった。 ε と同様の評価方法にて扁平粉末の結晶子サイズ d ³⁾を評価した結果、1.2C以上のC量を含む組成におい

て、10nm未満と微細であることが分かった。すなわち d の減少に伴い、 $S_w \delta$ が増大することが示唆される。また、C、Cr量の増加がオーステナイトの安定性を高めマルテンサイト変態開始温度を低下させることも扁平加工により生成するマルテンサイトの性質に影響している可能性がある。

このように、前報²⁾で作製した組成からC、Cr量を増加した組成において、様々な因子の影響により $S_w \delta$ が増加することで、 f_r を高周波化することができたと考えられる。

5. 結言

本研究では、100MHz帯インダクタの高性能化を目的として、Fe-C-Cr系扁平粉末を用いた磁性シートの周波数特性を評価し、C、Cr量が磁気特性および材料パラメータに及ぼす影響を調査した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 組成の違いによる透磁率の周波数特性について、C、Cr量の増加に伴い、 μ'' の抑制が明確に認められた。また μ'' および $\tan \delta$ のピーク周波数は組成依存性を示し、高C、高Cr組成ではより高い周波数側に位置し、極大値も小さくなる傾向が確認された。これらの結果より、1.6C-13Cr組成は100MHz帯インダクタの高性能化に寄与する材料であることが分かった。
- (2) C、Cr量の増加に伴い ε は増大し、 H_c は ε の増加に対応して上昇した。これはC量の増加に伴いマルテンサイト中の固溶C量が増加することで、格子内の不均一な歪みが磁壁の移動を妨げ、結果として磁壁のピン止め効果が強まるためと考えられる。さらに1.6C-13Cr組成では、 ε によるピン止め効果に加えて、 M_7C_3 型炭化物によるピン止め効果が重畳して働き、結果として他の組成よりも H_c がより高い値を示したと考えられる。
- (3) 本研究で作製した組成について、C、Cr量の増加に伴う高 f_r 化は、 $S_w \delta$ が寄与していることが分かった。加工誘起マルテンサイトを主とする組織が $S_w \delta$ の増大に有利に働き、さらに高C、高Cr組成では d の微細化および M_7C_3 型炭化物の存在が高 f_r 化に寄与した可能性が示唆された。

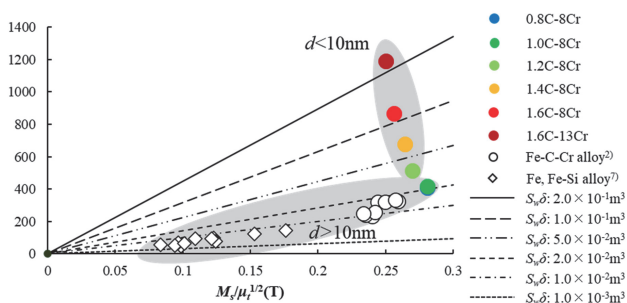


Fig. 6 Relationship between resonance frequency f_r and $M_s/\mu_t^{1/2}$.

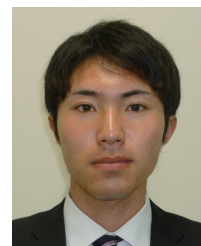
参考文献

- 1) 徳岡輝和, 前田徹, 伊志嶺朝之: 素形材, 52 (2011), 11.
- 2) 細見凌平, 三浦滉大, 澤田俊之: 山陽特殊製鋼技報, 30 (2023) 1, 62.
- 3) 高木節雄, 赤間大地, Jiang Fulin, 土山聡宏: 材料, 67 (2018) 3, 383.
- 4) 岩村真歩, 塚原真宏, 井戸原修, 三阪佳孝, 高木節雄: 鉄と鋼, 107 (2021) 10, 853.
- 5) 高木節雄, 増村拓朗, 土山聡宏: 熱処理, 65 (2025) 4, 284.
- 6) 近角聡信: 強磁性体の物理 (上), 裳華房, (1978), 32.
- 7) 三浦滉大, 澤田俊之: 山陽特殊製鋼技報, 26 (2019) 1, 33.
- 8) 太田恵造: 磁気工学の基礎 II, 共立全書, (1973), 317.

■ 著者



細見 凌平



三浦 滉大



澤田 俊之