

## Fe 系ナノクリスタル磁性材料の磁場中熱処理による高周波比透磁率の向上

日大生産工(院) ○小林 拓巳 日大生産工 矢澤 翔大 工藤 祐輔  
東静工業株式会社 佐久間 穂崇 渡邊 洋

## 1. 研究背景

近年、電気自動車など次世代自動車の発展により電子部品の小型化、高性能化が要求されるようになった。特にノイズ除去に用いられる車載コイルは自動車の発展に応じた、高周波数帯域での特性や高いキュリー温度が必要である。ナノクリスタル磁性材料は、高周波数帯域でも優れた磁気特性を示し、キュリー温度も  $570\text{ }^{\circ}\text{C}^{(1)}$  と高いため車載コイルに適した特性を持つ。

このナノクリスタル磁性材料とは Fe-Si-B アモルファス磁性材料に Cu, Nb を添加した材料<sup>(1)</sup>が一般的である。アモルファス磁性材料に Cu, Nb を添加すると、Cu が結晶物の核になり  $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$  結晶核を生成<sup>(1)</sup>する。また、高濃度の Nb が粒界アモルファスに濃縮され、ナノサイズの  $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$  結晶が生成される。ナノクリスタル磁性材料は結晶が小さいため、結晶磁気異方性が非常に小さくなる。加えて、微細結晶と残留アモルファスによって、磁歪も小さくなる<sup>(1)</sup>。以上のように磁歪と結晶磁気異方性がどちらも小さいためナノクリスタル磁性材料は優れた軟磁性特性を示す。

このナノクリスタル磁性材料に磁場中熱処理を行うことにより、磁区構造を変化させ、誘導磁気異方性を付与することで、高周波特性が向上する<sup>(1)</sup>ことが分かっている。また、前年までの研究ではナノクリスタル磁性材料の薄帯幅方向に対して最適な磁場印加強度かつ最適な熱処理温度で磁場中熱処理を行った<sup>(2)</sup>。この結果から磁場中熱処理によって低角形比の BH ループ、高周波数帯での比透磁率の上昇、低損失が確認できている<sup>(3)</sup>。

## 2. 目的

本研究では、磁場印加強度を  $0\sim 400\text{ kA/m}$  まで、熱処理温度を  $580\sim 620\text{ }^{\circ}\text{C}$  まで変化させた場合の高周波領域での各パラメータを検討した。

また、本研究では低周波とは  $100\text{ kHz}$  以下、高周波領域とは  $100\text{ kHz}$  以上のことを指している。

## 3. 実験方法

Fe-Si-B-Nb-Cu 薄帯から幅  $5\text{ mm}$ 、内径  $6.5\text{ mm}$ 、外径  $8.9\text{ mm}$  のコアを作製し、磁場中熱処理を行った。本実験では磁場中熱処理温度を  $580\sim 620\text{ }^{\circ}\text{C}$  まで  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  刻みで変化させ、磁場印加強度を  $0, 40, 80, 160, 240, 400\text{ kA/m}$  と変化させた。また、 $0\text{ kA/m}$  とは無磁場のことである。熱処理後の試料に関してインピーダンスアナライザ(HIOKI 社製 型番 IM3570)を用いてインダクタンス値を測定し比透磁率を算出した、BH アナライザ(IWATSU 製 型番 SY-8218)を用いて BH ループと角形比を測定した。BH ループにおいて最大に達した磁束密度を最大磁束密度  $B_{800}$ 、残留磁束密度  $B_r$  と呼び、残留磁束密度と最大磁束密度の比で表したものを角形比  $(B_r/B_{800})$  と呼んでいる<sup>(4)</sup>。

## 4. 実験結果

印加磁場依存性( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  のとき)の周波数特性を Fig.1 に示す。

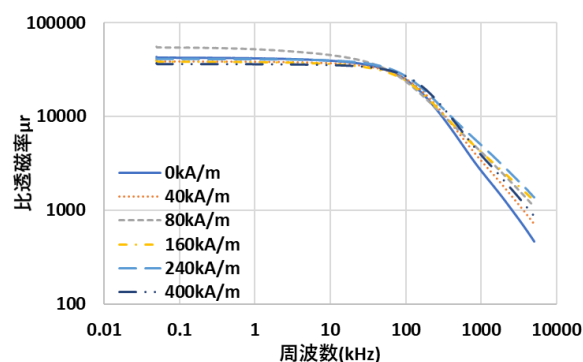


Fig.1 比透磁率の印加磁場依存性( $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Fig.1 の低周波数では  $80\text{ kA/m}$  が最も高い特性を示し、 $0\text{ kA/m}$  が最も低かった。また  $40\text{ kA/m}$  では

0 kA/m とほとんど変わらない周波数特性を示した。

高周波数帯域では、40 kA/m から 240 kA/m まで印加磁場強度が高いほど比透磁率が向上していた。しかし、高周波領域において 240 kA/m 以上の磁場を印加させ、400 kA/m まで磁場印加強度を高くすれば高くするほど、5 MHz のとき 400 kA/m までに比透磁率が約 43 % 減少した。

また、各周波数での比透磁率の減少率は 240 kA/m から 400 kA/m までにおいて、500 kHz では約 15 % 減少、5 MHz では、約 17 % 減少と高周波になるほど大きく、影響を受けていることがわかった。

これらのことから、500 kHz では 160~240 kA/m 帯が最も高く、5 MHz では 320 kA/m 帯が最も多くなることがわかった。

Fig.2 に 0kA/m と 40kA/m の BH ループを示す。

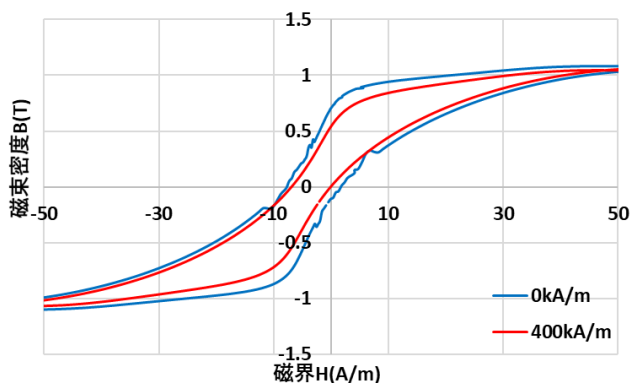


Fig.2 0kA/m と 40kA/m の BH ループ

Fig.2 には磁場中熱処理温度が 600 °C で、磁場印加強度が 400 kA/m の結果と 0 kA/m の BH ループを示す。Fig.2 を見るとわかる通り、0 kA/m の BH ループよりも 400 kA/m の BH ループのほうが寝ていることがわかる。磁場印加強度 400 kA/m の磁場を印加することで角形比が低くなった。

Fig.3 には各印加磁場における角形比を示す。0 kA/m から 40 kA/m までの角形比はほぼ変化しなかった。しかし、磁場印加後において 40 kA/m から 80 kA/m までは、角形比が低くなった。そして、80 kA/m から 400 kA/m までではほぼ横ばいの角形比を示した。よって、磁場印加強度を上げることで角形比を低くするには上限があることがわかった。

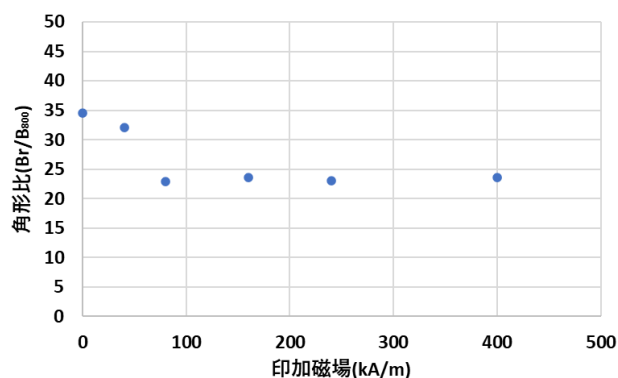


Fig.3 角形比(600 °C のとき)

## 5.まとめ

本研究では組成 Fe-Si-B-Cu-Nb の薄帯に対し高周波数帯域における特性向上を目的に磁場中熱処理を行い、磁場依存性と温度依存性の観点から検討した。磁場中熱処理を行うと、最も比透磁率を向上させるために必要な磁場印加強度は高周波になればなるほど上昇する。100 kHz では熱処理温度が 600 °C のときに 160~240 kA/m 帯であり、1 MHz では熱処理温度が同じく 600 °C のとき 320 kA/m のときに最も比透磁率を向上させることがわかった。また、どの熱処理温度でもどの磁場印加強度でも若干ではあるが誘導磁気異方性が付与され、比透磁率の向上することがわかった。

角形比については磁場印加強度を高くすると、磁場印加強度 80 kA/m までは低下しているが、以降磁場印加強度を高くしてもほぼ横ばいとなることがわかった。

## 参考文献

- (1) 「Fe 系微細結晶の磁場中熱処理による磁気特性及び信頼性」 佐久間 穂崇、矢澤 翔大、渡邊洋、新妻 清純、日本磁気学会(2022)
- (2) 「Fe 系ナノクリスタル材料の磁場中熱処理による高周波比透磁率の向上」 小林拓巳、矢澤 翔大、工藤祐輔、渡邊洋、学術講演会(2024)
- (3) 「ナノ結晶 Fe-Cu-Nb-Si-B 合金の誘導磁気異方性と磁気特性」 吉沢克仁、森春幸、荒川俊介、山内清隆、日本応用磁気学会 19,457-460(1995)
- (4) 「磁気工学入門」 高梨 弘毅 日本磁気学会