

低炭素社会実現に資する 高磁束密度・超低損失軟磁性材料(M alloy) の開発と社会実装

牧野 彰宏¹⁾ 遠藤 孝²⁾ 菅原沙矢香³⁾ 小林 崇⁴⁾

1. 概 要

軟磁性材料分野で長年希求され、従来から両立が非常に難しいとされてきた高い磁束密度と優れた軟磁気特性、低損失特性を兼ね備えた、新しい高鉄濃度 Fe 基ナノ結晶材料 (FeSiBPCu) が、2009年東北大学牧野研究室にて世界に先駆けて開発された⁽¹⁾。本材料をコア材として用いることでモータ、トランスや磁性部品の大幅な高効率化、省エネ化や小型化が可能であることが実証されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

大学での学術研究レベルの成果から社会実装への進化のための重要な課題は、低コストでの材料安定生産供給と種々の形状やサイズの部材において研究室レベル以上の磁気特性を実現することである。発明から10年以上の歳月を経て、安価な原料を使い、多様な部材(巻きコア, 板)においても、高価な高純度原料を用いた研究室レベル以上の優れた磁気特性が安定的に得られる新たな材料組成(M alloy)と、安定供給可能な材料製造法およびナノ結晶化新規熱処理法の確立に至った。M alloy は広範な製品に用いられ、軟磁性材料において新たなイノベーションを起こし、低炭素社会実現に貢献していくものと期待される。

2. 材料開発の背景と経緯

軟磁性材料においては、100年以上前に英国で開発されたケイ素鋼がモータや送電トランス等の磁心として現在も用いられ、約2兆円である莫大な世界市場のほぼ95%を占めて

いる。この間、多種多様な新材料が開発されたが、その基本的な特性である高い磁束密度が得られなかったため、ケイ素鋼の代替材には成り得なかった。モータやトランスの効率は、それらの磁心である軟磁性材料の損失特性に強く依存する。現在、モータ、トランスの軟磁性材料磁心に起因する損失は国内全電力消費量の3.4%に達し、その電力損失量は火力発電所50万 kwh クラス7基分に、また、温室効果ガスである CO₂ 排出量に換算すると約1424万トン(国内総排出量の1.1%相当)に相当する。近年、ケイ素鋼の損失特性改善は技術の成熟に伴い、飽和状態に達しており、加えて今後、自動車などの電動化が急速に進むことを考慮すると、さらなる省エネ社会の実現のため、ケイ素鋼を凌駕する新たな低損失軟磁性材料の出現が切望されてきた。

この新しい軟磁性材料に必須な基本要件は、従来から両立が困難とされてきた高い磁束密度と優れた軟磁気特性(低い損失特性)の兼ね備であり、これは、軟磁性材料開発における根源的な目標そのものである。軟磁気特性(損失特性)の向上のため、従来から、Fe への様々な元素の合金化による磁歪と磁気異方性の極小化が長年行われてきた。近年では、非平衡化(アモルファス, ナノ結晶)が新たな手法として採り入れられているが、この場合にも相当量の合金化が必須である。いずれの場合も合金化に伴い鉄濃度が低下することから、結果として磁束密度が犠牲になり、高い磁束密度と優れた損失特性の両立には至らなかった。筆頭著者は2009年に、ケイ素鋼に匹敵する 1.8 T 以上の飽和磁束密度と著しく低い損失(ケイ素鋼の 1/2 から 1/10)を兼ね備えた超高 Fe 濃度ナノ結晶軟磁性合金 (Fe-Si-B-P-Cu 図1中従来ナノ結晶材料(M))の開発に成功した(図1)⁽¹⁾。

3. 高鉄濃度 Fe-Si-B-P-Cu ナノ結晶材料(図1中従来ナノ結晶(M))の研究開発

高い磁束密度と優れた軟磁気特性の両立は、高 Fe 濃度非晶質組織を前駆体としたナノ結晶組織の実現により、すなわち、高い飽和磁束密度は Fe 基非晶質相のナノ結晶化に必須

* 株式会社 Makino : 1) 代表取締役, 東北大学名誉教授, 2) 技術グループ エンジニア, 3) 技術グループ リーダー, 4) 管理グループ リーダー

Contributing to the Realization of a Low-carbon Society through Development and Social Implementation of a Soft Magnetic Material (M alloy) with Ultra-low Loss and High Magnetic Flux Density; Akihiro Makino*, Takashi Endo*, Sayaka Sugawara* and Takashi Kobayashi* (Makino Co., Ltd.)
2022年10月28日受理[doi:10.2320/materia.62.55]

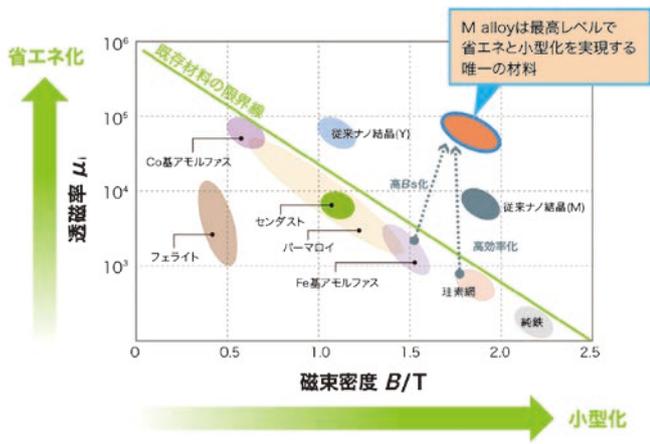


図1 種々の軟磁性材料における軟磁気特性(透磁率)と磁束密度の関係.

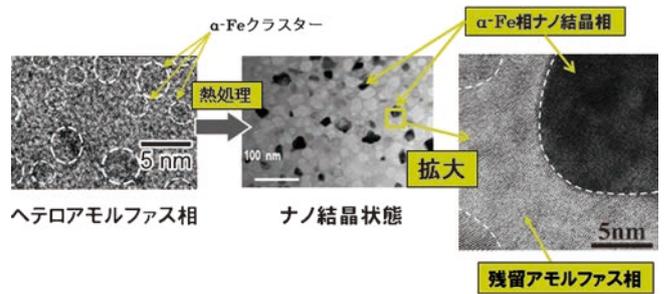


図2 ナノ結晶軟磁材料の微細組織.
(ヘテロアモルファス, ナノ結晶)



図3 自動制御された液体急冷オペレーション.

とされてきた Nb, Zr などの遷移金属(ナノ結晶化元素)の排除と高鉄濃度により, 優れた軟磁気特性は均質なナノ結晶組織により実現できると着想した.

しかし, その実現には本質的課題が存在した. それは, 高い磁束密度を実現できる 83 at% 以上の高 Fe 濃度 Fe-半金属合金は, 液体急冷法により非晶質単相は形成されず, 過剰な Fe は非晶質マトリクス中に μm オーダー以上の粗大な $\alpha\text{-Fe}$ 相として析出するため, ナノ結晶組織の前駆体と成り得ないことであった. 2009年, 従来, 非晶質形成が困難とされていた 83 at% 以上の高鉄濃度 Fe-半金属系合金において, 適量かつ, 特定比率の P と Cu の複合添加効果により, 均質な非晶質相から偏倚した不均質な, 2-3 nm 以下の Fe クラスタを内包した特異な非晶質相が高密度に形成され⁽²⁾, その後の熱処理によりこの不均質性を起点として, 従来と異なる新規のメカニズムでナノ結晶化が実現することを見出し(図2), 2つの基本特性の両立という根源的課題を解決した⁽²⁾.

図1に示すように, 本材料(図1中従来ナノ結晶(M))は従来材料において実現できなかった軟磁気特性と高磁束密度の両立を実現した初めての材料である. 本材料の応用展開を目指し, 大学-企業との密接な連携の中, モータ, トランス等の電気-磁気変換製品に磁心材料として実装した結果, 世界最高クラスの高効率が実証され, 本材料の応用展開の可能性を検証した⁽³⁾⁽⁴⁾.

4. 実用化までの道のり

大学研究室では試薬レベルの高価な原料を使い, 少量ずつ

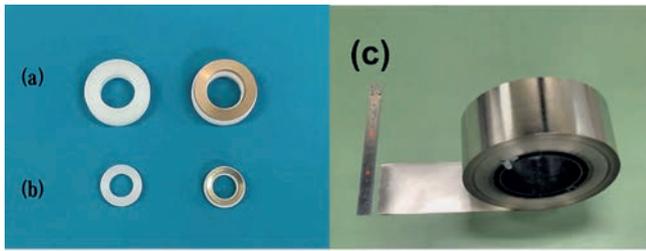
表1 M alloy と従来ナノ結晶材料(Y, M)の特性比較.

トロイダルコア	Bm(T)		
	0.8	1.0	1.2
M alloyコア	0.03	0.05	0.07
従来ナノ結晶(Y)(FeNbSiBCu)	0.03	測定不能	測定不能
Fe基アモルファス	0.23	0.35	0.44
従来ナノ結晶(M)(FeSiBPCu)	0.11	0.17	0.24

トロイダルコア	周波数(kHz)			
	1	10	100	1000
M alloyコア	60,000	50,000	17,000	1,650
従来ナノ結晶(Y)(FeNbSiBCu)	72,000	58,000	15,000	1,650
従来ナノ結晶(M)(FeSiBPCu)	10,000	9,600	4,800	740

丁寧に薄帯を作製し, ナノ結晶化熱処理も高精度な小型炉を用いてきた(図1中従来ナノ結晶(M)). 工業化のためには小型から大型までの種々の部材, 部品において安定かつ優れた性能と低コストの実現が必須であり, このため非常に高いハードルが存在した. この解決に向けた研究開発は国内外の企業や研究機関で行われてきているが, 社会実装は実現されていない.

我々は2009年の研究室レベルでの本材料開発成功から10年余りの長い道のりの中で, 非常に多くの難しい技術課題を着実に解決してきた. アモルファス形成能を低下させる不純



(a) $\phi 30 \times \phi 20 \times H10$ (b) $\phi 18 \times \phi 14 \times H5$
 (c) アモルファス薄帯

図4 ナノ結晶トロイダルコアとアモルファス薄帯.

トロイダルコア



ワイヤレス充電

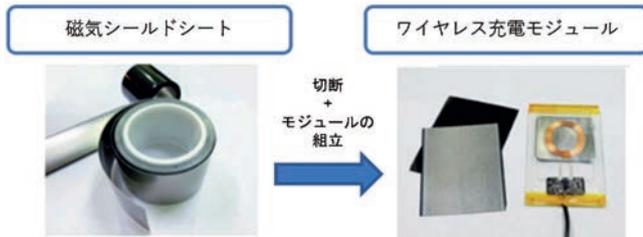


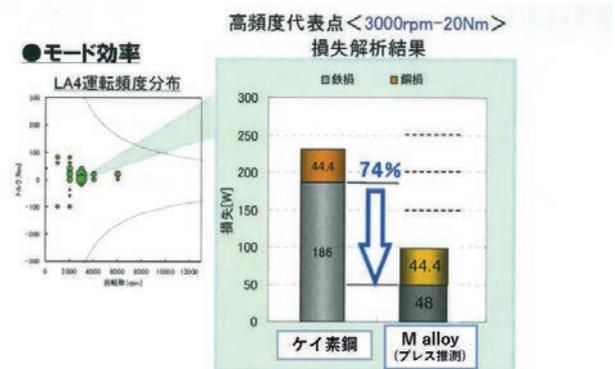
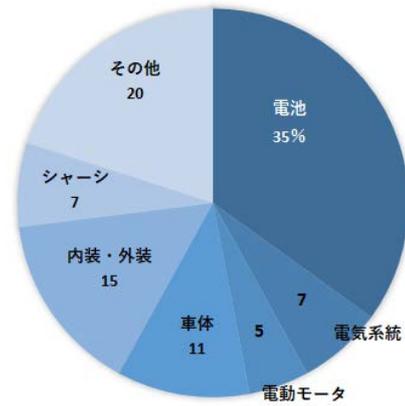
図5 M alloy の応用製品.

物を含む安価な原料を使い、多様な部材(巻きコア, 板)においても、高価な高純度原料を用いて少量試作された研究室試料レベル以上の優れた磁気特性が安定的に得られる新たな材料組成(M alloy)と、安定供給可能な材料製造法(図3)およびナノ結晶化新規熱処理法を確立し、社会実装可能な段階に至った。本技術は特許でガードされている。図1に示すようにM alloyは従来のナノ結晶材料(Y, M)よりも高いレベルで高い磁束密度と優れた軟磁気特性を兼備し、損失も著しく低い実用材料であるため(表1), モータ, トランスからトロイダル小型磁性部品やシート状無線充電用磁性部品まで広範に使用可能であり, それらの小型化, 高効率化と省エネ化が実現できる。さらに価格についても, 現在量産されている従来ナノ結晶(Y)よりも大幅に低く, Fe基アモルファス同等と推測され, 社会実装へのバリアーは低い。

5. 応用展開と実用化状況, 今後の展望

弊社 (<https://www.akmakino.com>) では, 用途に合わせた形状の M alloy(アモルファス)と当社が独自開発したナノ結

EV 価格内訳



電気自動車に適用した場合、電費約4%の向上が予測される

図6 EV 価格内訳と M alloy の EV モータへの適用効果.

晶化熱処理後のトロイダルコア, シートの提供をスタートしている(図4)。

現在, 種々の企業とサンプル提供を通してネットワーク構築を進めており, 近い将来多くの省エネ製品やその部品としての社会実装が期待される(図5)。

とりわけ, EV モータに M alloy が用いられることによる著しい高効率化と, それによる車全体のコストの35%を占めるバッテリーの負荷軽減や航続距離の向上が予測され, EV 化を加速し, 低炭素社会実現に資するものと推察される(図6)。

6. 特 許

本開発に関わる特許は3件出願しており, 特許第7034519号など3件全て登録されている。

文 献

- (1) A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta and A. Inoue: Mater. Trans., **50**(2009), 204-209.
- (2) A. Makino: IEEE Trans. Magne., **48**(2012), 1331-1335.
- (3) K. Takenaka, N. Nishiyama, A. D. Setyawan, P. Sharma and A. Makino: J. Appl. Phys., **117**(2015), 417D519.
- (4) N. Nishiyama, T. Tanimoto and A. Makino: AIP Advances, **6**(2016), 055925-1-055925-5.