

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360309

研究課題名（和文） 新規な高鉄濃度鉄－半金属バルクアモルファス合金の創製と
その形成機構の解明研究課題名（英文） Synthesis of newly Fe-metalloids bulk amorphous alloys
with high Fe content and prospecting the mechanism of
their amorphous-forming ability

研究代表者 牧野 彰宏 (MAKINO AKIHIRO)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：30315642

研究成果の概要（和文）：

Fe-Si-B 合金に P や C を添加し、その添加量を最適化することで、50K を超える大過冷却液体域を発現するアモルファス合金を見出し、これらの合金では最大で直径 3mm のアモルファス単相バルク材が作製できることと、1.5T を超える高飽和磁束密度と低保磁力が発現することを見出した。さらに、Fe-Si-B-P-Cu 合金は、3GPa 以上の高降伏強度を維持しながら 4% に達する高塑性変形能を有することを見出した。また、Fe-Si-B-P 焼結アモルファスバルク材が珪素鋼よりも低い高周波鉄損特性を示すことを見出した。

研究成果の概要（英文）：

New Fe-metalloids based amorphous alloys with a wide supercooled liquid region of over 50 K have been synthesized by the addition of P and/or C and subsequent optimization of metalloid composition. These alloys can be form a bulk rod specimen with a diameter of up to 3.0 mm and exhibit high magnetic flux density of above 1.5 T as well as extremely low coercivity. Furthermore the Fe-Si-B-P-Cu bulk amorphous alloy shows both high fracture strength of above 3GPa and high plastic deformability of 4%. On a development of the soft magnetic core, a spark plasma sintered Fe-Si-B-P bulk amorphous core performs lower magnetic core loss than that of typical silicon steel in the high frequency region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009 年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 材料工学・ 構造・機能材料

キーワード:アモルファス形成能, バルクアモルファス合金, 軟磁性材料, 鉄基アモルファス, 高飽和磁束密度

1. 研究開始当初の背景

Fe 基合金は、従来の結晶合金に加え、液体急冷法によるアモルファス合金薄帯、さらにそのバルク化により、社会基盤材料としての可能性を拡大してきている。最近開発されてきた Fe 基バルクアモルファス合金は、従来

の急冷薄帯の形状的制約を緩和できるため、次世代の基盤材料として期待されているが、そのバルク化を達成するために多量・多量の希少金属を含み、結果として、本来の Fe 基結晶合金や急冷薄帯アモルファス合金の持つ特性上や資源面での優位性を失っている。

換言すれば、Fe 基バルクアモルファス合金は極めて優れた軟磁性を示すため、省エネ向け素材としての工業的な魅力はあるが、これまでに見出されてきた Fe 基バルクアモルファス合金の飽和磁束密度は現行の珪素鋼板の約半分、上述アモルファス薄帯の 70%程度までであり、なおかつ高価な元素の多量添加と相まって、性能と価格の面から汎用的軟磁性材としての実用化は難しいとされ、学術的な研究対象と位置付ける見方が主流となりつつあった。

我々は、添加元素が Fe 基アモルファス合金のアモルファス形成能に及ぼす影響を調査する取り組みの中で、典型的な急冷アモルファス合金である $Fe_{78}Si_9B_{13}$ に P を少量添加した際に、アモルファス形成能が顕著に向上する特異な現象を見出した。従来、Fe 基アモルファス合金のアモルファス形成能の向上には、Nb や Zr 等の高価な非磁性遷移金属元素の添加が必須とされてきたが、見出した合金はこれら元素を一切含まない。よって、本 Fe-Si-B-P アモルファス合金は従来概念とは別のメカニズムによって、アモルファス形成能の向上を達成していることが推察された。また、高価で飽和磁束密度の著しい低下を引き起こす遷移金属元素を含まない点にも着目し、安価な元素のみから構成され、実用化に値する高飽和磁束密度を有しつつバルク化を可能とする、新しい Fe 基バルクアモルファス合金の創成を試みるに至った。

2. 研究の目的

目的は、下記に大別する 4 項からなる。

(1) 超急冷でのみアモルファス相を生成可能な Fe-Si-B 合金に P を添加することでアモルファス形成能が顕著に向上する現象について、半金属元素量の影響を組成探査により系統的に調べ、次いで、ナノ構造、結晶化過程や密度、粘性の温度依存性などを調べ、過冷却液体の安定化との関係を考察する。

(2) 前項 (1) の追加実験として、半金属である Si、B、P に加えて C を添加した場合のアモルファス形成能の組成依存性を調査し、熱的に安定な過冷却液体をもつ Fe-半金属バルクアモルファス合金を開発する。

(3) バルク化を含めアモルファス形成能を支配する要因を明らかにするために、本合金系がシンプルな系であることを生かし、計算科学的なアプローチを通してより深い理解と現象論の解明を行う。

(4) 社会基盤材料としての可能性を見極めるため、実用材料として重要な機械的、磁氣的性質について詳細に調査し、優れた性質を追及するとともに、希少金属を含む種々の材料の代替材料としての可能性についても検討する。

3. 研究の方法

“2. 研究の目的”に記載した 4 項に対応

する研究の方法を下記に示す。

(1) Fe-半金属系 4 元合金である Fe-Si-B-P におけるアモルファス構造の生成組成範囲とその熱安定性について、X 線回折、電子顕微鏡、熱分析器各種 (DSC、DTA、TMA) を用いて調査する。その際、本研究を含め現在までに明らかにされている Fe 基バルクアモルファス合金における一連の研究報告について、アモルファス構造の安定化の観点から系統的に整理し、経験則的な予測や傍証と、実験事実から得られた本質とを明確に区別して比較検討の材料とする。同時に、高いアモルファス形成能を示す組成については、鑄造法を用いて丸棒状バルク試料の作製を行い、アモルファス単相を生成し得る臨界直径を確認する。

(2) 4 元系の Fe-Si-B-P 合金と同様に、アモルファス構造の生成組成範囲とその熱安定性について、構造と熱安定性の両面から調査し、これらとアモルファス形成能およびアモルファス化臨界直径との対応性を系統的にまとめる。

(3) 高アモルファス形成能発現の起源を探るため、計算機を用いた動力学的シミュレーションによって、アモルファス安定化要素である短範囲クラスターのモデル構築を行ない、これを実験結果と比較し、関連付けをすることで、現象論的な解釈を与える。

(4) Fe-半金属系バルクアモルファス合金の応用化展開を見据えた研究として、破壊強度やヤング率といった機械的性質の調査、さらに、飽和磁化、保磁力、透磁率や鉄損といった磁気特性に挙げられる基礎的な緒物性を調査する。次いで、実用化を見据えた試作品を作製し、実験的検証を行う。

4. 研究成果

(1) アモルファス相の安定化現象の調査と磁気特性

図.1 は Fe-Si₉-B-P 擬 3 元系合金における急冷薄帯の相図を示す。ここから、広い組成領域でアモルファス単相が生成されることが分かる。また、“glassy”で表記している、Fe 濃度 72~78at%、B 濃度 2~13at%、P 濃度

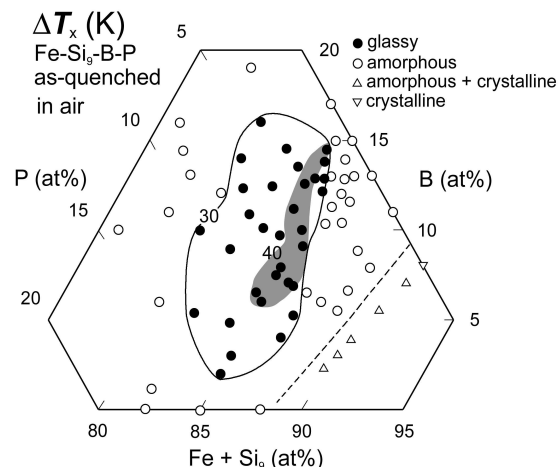


図.1 Fe-Si₉B-P 合金急冷薄帯の相図。

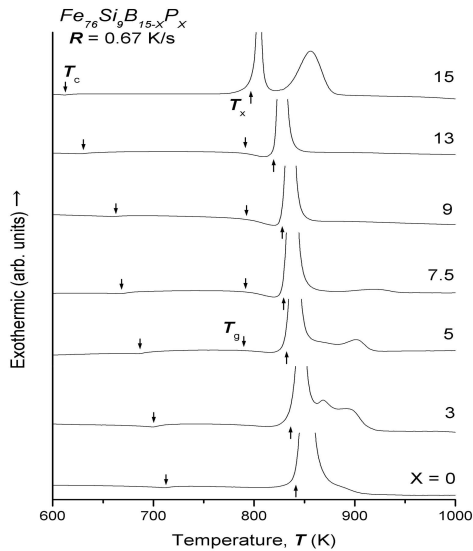


図.2 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15-x}\text{P}_x$ 合金急冷薄帯の示差熱分析曲線.

2~15at%で囲まれる領域では、示差熱分析の結果から、ガラス遷移 (T_g) を発現することが確認され、特に、Fe 濃度 75~78at%、B 濃度 6~14at%、P 濃度 2~10at%の領域では、40Kを超える広い過冷却液体領域 (ΔT_x) を示すことが分かった。ここから、Fe-Si-B-P 合金は高 Fe 濃度、かつ Fe 以外の金属元素を含まない合金であるにも関わらず、典型的急冷アモルファス合金である Fe-Si-B に P を添加し、半金属量を最適化することでガラス化を実現していることが分かる。図.2 は液体急冷法にて作製された厚さ約 $20\ \mu\text{m}$ の $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15-x}\text{P}_x$ 合金薄帯の示差熱分析曲線を示す。P 濃度が 0 と 15at%、すなわち 3 元組成の $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 、

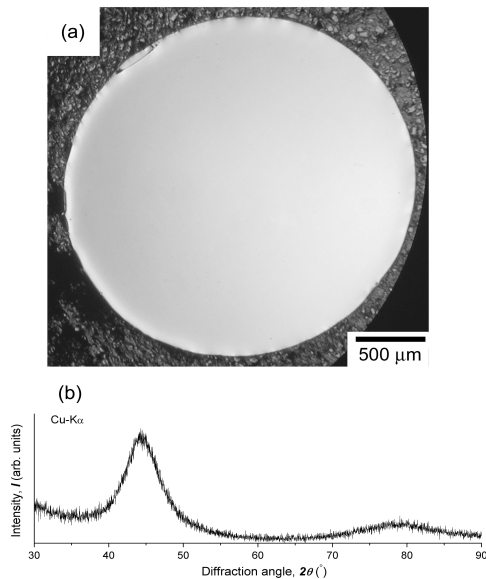


図.3 銅鑄型鑄造法で作製された直径 2.5mm の $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ バルクアモルファス合金丸棒材の (a) 断面光学顕微鏡写真、(b) X 線回折図形.

$\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 合金ではガラス遷移現象は確認されず、典型的な急冷アモルファス合金であるが、P 濃度 5~13at%の時の 4 元合金では、結晶化温度 (T_x) 以下の温度で T_g が発現している。特に、P 濃度 5at%の時、Fe-半金属系アモルファス合金の中では最大級となる 52K の高い ΔT_x が得られた。図.3 は鑄型鑄造法で作製された直径 2.5mm の丸棒状バルク試料の切断面の光学顕微鏡写真、および断面から得られた X 線回折図形を示す。図.3(a) は 1vol%HF に 30 秒浸漬後の観察後の光学顕微鏡写真であるが、析出結晶を示す腐食の形跡は見られない。また、図.3(b) から、アモルファス相の生成を示すハローのみが確認され、結晶を示す鋭い回折ピークは認められない。このことから、 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 合金は従来の Fe 基バルクアモルファスの開発手法である非磁性遷移金属を添加しなくても、直径 2.5mm までのバルク化が達成可能であることがわかる。

これと同様にして、5 元型の Fe-Si-B-P-C 合金についても半金属組成の最適化を行った結果、 $\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$ で 54K のさらに広い ΔT_x を示すことが確認され、その臨界アモルファス直径は 3.0mm まで増大することが分かった。

図.4 はバルク化可能な $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ アモルファス、ならびに同じコンセプトで開発された $\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$ アモルファス、さらに比較材である $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 急冷アモルファスの 3 種の合金の液体急冷薄帯における室温での保磁力 (H_c) の熱処理温度依存性を示す。ここから、熱処理によって Fe-Si-B-P(-C) 合金の H_c は、典型的急冷アモルファス合金のものよりも格段に低下することがみてとれる。また、 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 合金は結晶化温度 (840K) より遙かに低温の 670K 熱処理で既に H_c の増加が確認されるが、Fe-Si-B-P(-C) 合金の H_c は T_g 直前の 750K 近傍まで低下を続ける。最適熱処理による H_c の値は $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 合金で 8A/m であるのに対し、Fe-Si-B-P(-C) 合金では 1A/m 程度まで低下する。密度測定の結果によれば、ガラス合金は熱処理後に顕著な密度変化を

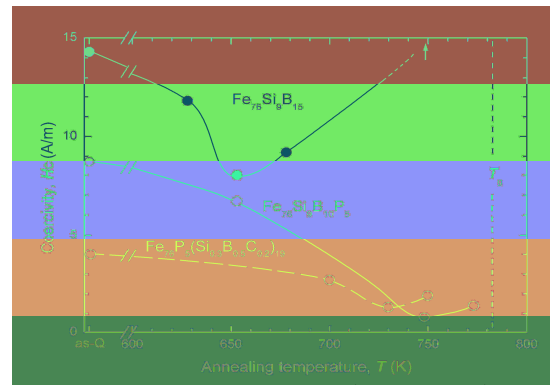


図.4 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ 、 $\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$ 、および $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{15}$ 合金薄帯における保磁力の熱処理温度依存性.

表.1 本研究で見出した $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ と $\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$ バルクモルファス合金、ならびに従来報告されている Fe 基バルクアモルファス合金における飽和磁束密度 (B_s) と保磁力 (H_c)、熱的パラメータ各種 (T_g 、 T_x 、 ΔT_x)、および銅鑄型鑄造法による臨界ガラス化直径 (D_{cr})。

composition	B_s (T)	H_c (A/m)	T_g (K)	T_x (K)	ΔT_x (K)	D_{cr} (mm)
$\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$	1.51	0.8	780	832	52	2.5
$\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$	1.44	1.2	780	834	54	3
$(\text{Fe}_{0.75}\text{Si}_{0.1}\text{B}_{0.15})_{98}\text{Nb}_4$	1.40	2.9	835	885	50	1.5
$\text{Fe}_{74}\text{Al}_4\text{Ga}_2\text{P}_{12}\text{B}_4\text{Si}_4$	1.14	6.4	733	782	49	-
$\text{Fe}_{73}\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{11}\text{C}_5\text{B}_4$	1.20	6.3	732	785	53	1
$\text{Fe}_{72}\text{Al}_5\text{Ga}_2\text{P}_{10}\text{C}_6\text{B}_4\text{Si}_1$	1.14	2.8	732	785	53	2
$\text{Fe}_{70}\text{Mo}_2\text{Ga}_2\text{P}_{10}\text{C}_4\text{B}_4\text{Si}_2$	1.32	2.9	738	788	52	2
$\text{Fe}_{30}\text{Co}_{30}\text{Ni}_{15}\text{Si}_9\text{B}_{17}$	0.92	3.4	780	834	54	1.2
$\text{Fe}_{74}\text{Nb}_8\text{Y}_3\text{B}_{17}$	0.81	15	831	879	48	2

示し、 H_c が極小を示した熱処理での合金密度は急冷直後のものよりも 2%以上の増加が確認されており、ここからガラス遷移現象を示す熱的に安定な Fe-Si-B-P(-C)合金は、磁束のピンニング・サイトとなる過剰自由体積の極めて少ない、非常に密な構造をとることが予想される。また、 T_g 近傍まで H_c の上昇が起こらないことは、本合金の結晶化に対するアモルファス相の構造安定性が極めて高いことを示唆すると言える。

Table.1 に Fe-Si-B-P(-C)合金、ならびに代表的 Fe 基バルクアモルファス合金における磁気特性およびガラス形成能を評価する熱的性質のパラメータをまとめた。磁気特性に着目すると、Fe-半金属系ガラス合金で飽和磁束密度 (B_s) が群を抜いて高いことと、 H_c が低いことがわかる。 B_s については、従来のバルクアモルファス合金よりも合金中の Fe 濃度が高いことと非磁性の遷移金属元素を含まないことなどによる複合的な結果として、1.44-1.51T もの高い値が得られたと理解できる。 H_c についても、従来の Fe 基バルク合金と比較して優れた値を示すが、上述したようにガラス相中の構造に由来し、稠密なガラス構造をとることによると思われる。アモルファス形成能については、Fe-半金属のみの組み合わせであっても、50K を超える広い ΔT_x を示していることと、 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_9\text{B}_{10}\text{P}_5$ で最大 2.5mm、 $\text{Fe}_{76}\text{P}_5(\text{Si}_{0.3}\text{B}_{0.5}\text{C}_{0.2})_{19}$ で最大 3mm のアモルファス単相の丸棒状バルク材が得られていることから、ガラス形成能向上のために希少金属の添加を必須とする従来の概念を覆すものであり、今後の Fe 基アモルファス合金開発に一石を投じる成果と考える。

(2) 動力学的手法によるアモルファス相安定化機構の調査

Fe-Si-B-P バルクアモルファス合金は、Fe-Si-B に P を少量添加することでアモルファス形成能の飛躍的な増大を達成している。この原因を、単距離～中距離秩序のクラスタ

ーサイズでの現象論として理解するため、第一原理計算によって Fe-Si-B-(P)合金で形成されるアモルファス相の原子構造がどのように変化するかについて調査した。

図.5には、短距離クラスタのボロノイ解析を行った結果を示すが、ここから P 添加により、(0 2 8 0)や(0 2 8 1)等の高配位数のプリズム構造が増加していることが確認できる。換言すれば、P 内包クラスタが形成され、クラスタ間の重なりの変化は面共有(3点共有)が増加していることが分かる。このことはつまり、P 添加により Fe-Si-B-P アモルファス相の原子構造が稠密充填構造化すると言え、本解析によって、前項で定性的に述べられていたアモルファス相の安定化現象における稠密充填構造の形成を、定量的に評価できたと考える。

(3) Cu 添加による機械的性質の改善

図.6 は銅鑄型鑄造法で作製した $(\text{Fe}_{0.76}\text{Si}_{0.096}\text{B}_{0.084}\text{P}_{0.06})_{100-x}\text{Cu}_x$ 合金 ($x=0, 0.1$) 丸棒状バルクの圧縮試験の結果である。Cu 無添加の $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{9.6}\text{B}_{8.4}\text{P}_6$ 合金は 3.25GPa の降伏強度と 0.7%の塑性変形を示す。この結果から、Fe-Si-B-P バルクアモルファス合金は、高アモルファス形成能、高 B_s と低 H_c に加えて、極めて高い機械強度を有することが明らかとなった。他方、 $(\text{Fe}_{0.76}\text{Si}_{0.096}\text{B}_{0.084}\text{P}_{0.06})_{99.9}\text{Cu}_{0.1}$

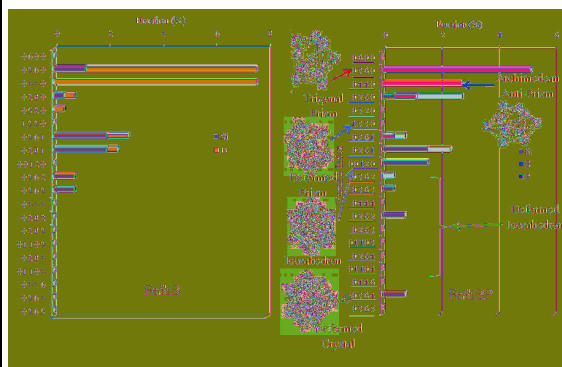


図.5 ボロノイ多面体解析結果。

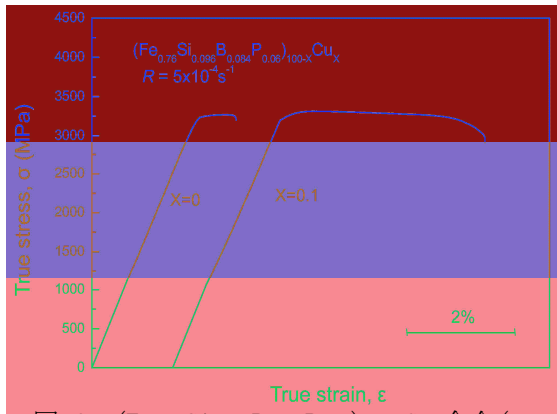


図.6 $(\text{Fe}_{0.76}\text{Si}_{0.096}\text{B}_{0.084}\text{P}_{0.06})_{100-x}\text{Cu}_x$ 合金 ($x = 0, 0.1$) バルク丸棒材における真歪-真応力曲線。

合金はわずか 0.1at% の Cu 添加によって、降伏強度を下げることなく 4% の非常に大きな塑性変形を示すことが分かった。この原因については、 $(\text{Fe}_{0.76}\text{Si}_{0.096}\text{B}_{0.084}\text{P}_{0.06})_{99.9}\text{Cu}_{0.1}$ 合金 铸造バルク材の電子顕微鏡観察から、数 nm 程度の極微細な α -Fe 粒子がアモルファス組織中に均一・多量に分散していることが確認されており、ここから、これら微粒子が圧縮時の一軸応力を多軸化し、シアバンドを多方向に形成、結果として、4% の大塑性変形の発現に至ったことが分かった。

(4) 応用化研究

Fe-Si-B-P アモルファス合金の高アモルファス形成能と優れた軟磁気特性に着目し、軟磁性コア材の試作とその特性評価を行った。図.7 はガスアトマイズ法で作製した $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{9.6}\text{B}_{8.4}\text{P}_6$ アモルファス粉末原料を放電プラズマ焼結法で固化成形した円板状およびリング状試料の外観写真である。ガスアトマイズ法によるアモルファス微粉末の大気中製造実験においては、Fe-Si-B-P 合金が高アモルファス形成能を有することによって、75 マイクロメートル以下の分級粉末はアモルファス単相であることが確認された。放電プラズマ焼結法によるバルク固化成形実験に

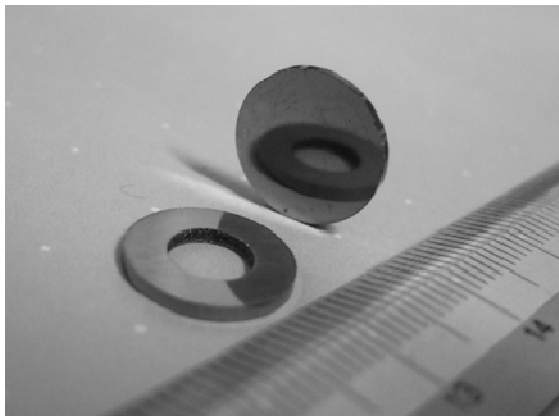


図.7 $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{9.6}\text{B}_{8.4}\text{P}_6$ 合金焼結バルクアモルファス円板状試料とリング試料の外観写真。

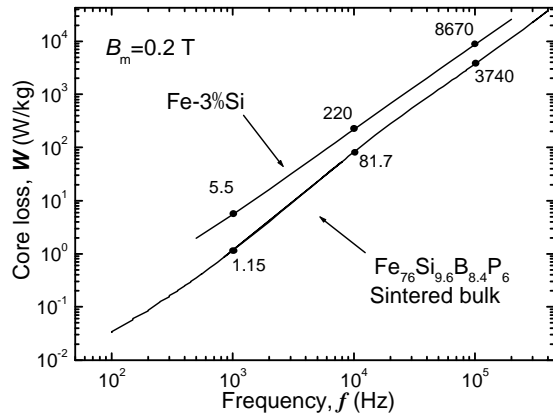


図.8 磁束 (B_m) 0.2T での $\text{Fe}_{76}\text{Si}_{9.6}\text{B}_{8.4}\text{P}_6$ 合金焼結バルクアモルファスリングと代表的珪素鋼における鉄損の周波数依存性。

おいては、ガラス遷移温度付近で試料の明瞭な軟化現象が確認され、ほとんど真密度のバルクアモルファス焼結材が作製可能であることが分かった。さらに、焼結時の加熱中に付与し続ける圧力の増加に伴い、軟化開始温度が低温化することを見出し、長時間保持しても結晶化の懸念が少ない温度領域における焼結が可能であることが分かった。また、ガラス遷移温度より 20K 低い 760K にて作製された焼結バルクコア材について熱分析を行った結果、加圧下で入熱することによる固化成形プロセスを経ても、急冷ガスアトマイズ粉末と同一のガラス遷移温度、結晶化温度、結晶化発熱量を示していることから、焼結後においても試料は固化成形前と同様の高い熱安定性を有するガラス相を維持していることが確認された。

760K にて焼結された FeSiBP バルクコア材の軟磁気特性を測定した結果、飽和磁束密度は 1.44T を超える値を有しており、この値はバルク固化成形を可能とする従来の全ての Fe 基アモルファス合金と比較して、最も高い値であることが分かった。その一方で、焼結バルクコア材の保磁力は 15~30A/m であり、液体急冷薄帯材や铸造バルク棒材と比較して明らかに増加していることが確認された。実用途を想定した 1~100kHz での鉄損特性の測定 (図.8) においては、市販の無方向性珪素鋼 (Fe-3\%Si) の 30% 程度と顕著に低い値を示しており、高周波領域で優れた低鉄損を有することが確認された。

よって、典型的急冷アモルファス合金と同等の非常に高い B_s と低鉄損特性、高ガラス形成能を兼備した本 Fe-半金属バルクアモルファス合金は、原料コストが安価であり、かつ、大気中で製造可能であることも合わせて考えると、これまでの Fe 基バルクアモルファス合金で問題視されていた性能・コストの両面における課題を克服しており、工業用途への展開が見込まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

①Li X, Kato H, Yubuta K, Makino A, Inoue A, Effect of Cu on nanocrystallization and plastic properties of FeSiBPCu bulk metallic glasses、Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing、査読有、527 巻、2010 年、2598-2602

②Makino A, Li X, Yubuta K, Chang CT, Kubota T, Inoue A, The effect of Cu on the plasticity of Fe-Si-B-P-based bulk metallic glass、SCRIPTA MATERIALIA、査読有、60 巻 5 号、2009 年、277-280

③Makino A, Kubota T, Chang C, Makabe M, Inoue A, FeSiBP bulk metallic glasses with high magnetization and excellent magnetic softness、JOURNAL OF MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS、査読有、320 巻 20 号、2008 年、2499-2503

[学会発表] (計 27 件)

①Xue Li, Hidemi Kato, Kunio Yubuta, Akihiro Makino, and Akihisa Inoue、Improved plasticity of Fe-based [(Fe_{0.432}Co_{0.288}B_{0.192}Si_{0.048}Nb_{0.04})_{0.9}Cr_{0.01}]_{100-x}Cu_x high strength bulk metallic glasses by Cu-induced nanocrystallization、ISMAM 2010、2010/7/6、スイス、チューリッヒ、Swiss Federal Institute of Technology

②A. Makino, X. Li, C. Chang, T. Kubota, A. Inoue、New Ductile Fe-rich Fe-based Bulk Glassy Alloys、New Ductile Fe-rich Fe-based Bulk Glassy Alloys、RQ13、2008/8/27、ドイツ、ドレスデン、Dresden University of Technology

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：アモルファス合金組成物
発明者：牧野彰宏
権利者：(株)東北テクノアーチ
種類：特許
番号：P2008-308209
取得年月日：2008/12/3
国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：アモルファス合金組成物
発明者：牧野彰宏
権利者：(株)東北テクノアーチ
種類：特許
番号：4310480
取得年月日：2009/5/22
国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

牧野 彰宏 (MAKINO AKIHIRO)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号：30315642

(2)研究分担者

張 偉 (ZHANG WEI)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：20400400
竹内 章 (TAKEUCHI AKIRA)
東北大学・原子分子材料科学高等研究
機構・准教授
研究者番号：40250815
湯蓋 邦夫 (YUBUTA KUNIO)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：00302208
木村 久道 (KIMURA HISAMICHI)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号：00161571

(3)連携研究者

()

研究者番号：