

# 高 $B_s$ アモルファス材料

## High $B_s$ Fe-based Amorphous Material

小川雄一\* Yuichi Ogawa  
吉沢克仁\*\* Yoshihito Yoshizawa  
谷川茂穂\*\* Shigeho Tanigawa  
Ryusuke Hasegawa\*\*\*  
稲垣勝敏\*\*\*\* Katsutoshi Inagaki  
福井和元\*\*\*\* Kazuyuki Fukui  
河島三晃\*\*\*\* Mitsuaki Kawashima

アモルファス変圧器の小型化・低騒音化を目的に合金組成の最適化を行い、高飽和磁束密度 ( $B_s$ ) アモルファスHB1材を開発した。HB1材は現行Metglas®2605SA1 (SA1) 材より飽和磁束密度 $B_s$ が0.07 T高く、騒音特性も改善されるため変圧器の小型化・低騒音化が期待できることがわかった。

このHB1材を用いた変圧器を試作した結果、低騒音化が可能であることを明らかにし、設計磁束密度 $B_m$ を0.1 T向上させ据付面積を10 %低減できる評価結果を得た。

We developed a Fe-based amorphous material (HB1) with a high  $B_s$  by optimizing alloy composition, resulting in reduction of the physical size and noise of an amorphous distribution transformer. HB1 material shows a higher  $B_s$  by 0.07 T and a lower noise level than Metglas®2605SA1 (SA1). A trial distribution transformer using HB1 material shows a lower noise level than a distribution transformer using SA1 material, making it possible to increase the transformer operating induction by 0.10 T and to decrease foot space by about 10 %.

### ① 緒 言

Fe基アモルファス材料は鉄損が低く、配電用変圧器の鉄心材料として使用した場合大きな省エネ効果があると提唱され、1970年代後半から1980年代にかけてFeB<sup>(1)2)</sup>、FeBC<sup>(3)4)</sup>、FeSiBC<sup>(5)</sup>、FeSiB<sup>(6)7)8)9)</sup>系合金などに関する研究が活発に行われた。1981年にAllied Signal社 (現Metglas, Inc.) がFeSiB系アモルファス合金Metglas®2605S2材を商品化し、米国でアモルファス変圧器の実用化が開始され、1990年代に入り国内でも実用化が始まった。現在はMetglas®2605SA1材 (以下SA1材と表記) <sup>10)</sup>が変圧器鉄心材として量産されている。昨今地球温暖化問題から温室効果ガス排出低減のため省エネ化が促進されており国内においても省エネ法が改訂され、鉄損が小さいFe基アモルファス材料が再度注目されている。特に民需配電用変圧器は2006年4月よりトップランナー制度が施行され、1999年対比で約30 %の損失低減が義務化されるため、アモルファス鉄心の市場拡大が期待される。表1に現在変圧器の鉄心材料として大きなシェアを占めている電磁鋼板とSA1材の主な材料特性と変圧器特性を示す。アモルファス材料は鉄損や無負荷損が電磁鋼板の1/3以下であるためアモルファス変圧器はトップランナー基準負荷率に相当する40 %での

総損失も約10%低く、非常に省エネに有効であることがわかる。しかし設計磁束密度 $B_m$ が低いいため、変圧器の重量、据付面積が大きくなる欠点がある。また騒音が大きいことも欠点の一つである。サイズ、重量はアモルファス材料の飽和磁束密度 $B_s$ が小さいこと、騒音は飽和磁歪定数 $\lambda_s$ が大きいことに起因する。変圧器の $B_m$ は1) 材料の $B_s$ に安全率を考慮した設計磁束密度、2) 鉄損が急激に上昇する手前の磁束密度、3) 騒音が基準値以下

表1 材料特性と変圧器特性の比較

Table 1 Comparison of material properties and transformer performance between SA1 material and grain-oriented silicon steel.

	Fe-base amorphous SA1	Grain-oriented silicon steel
Material properties( single sheet )		
Saturation induction, $B_s$ ( T )	1.57	2.03
Core loss, $P_{14/50}$ ( W/kg )	0.08	0.50
magnetostriction, $\lambda_s$ ( $10^{-6}$ )	27	- 1
Electrical resistivity( $\mu$ m )	1.3	0.4
Transformer performance		
Operating induction, $B_m$ ( T )	1.34	1.65
Foot space( % )	100	90
Total weight( % )	100	81
No-load loss( W )	220	685
Total loss( W ) ( Load factor 40% )	1,212	1,364
Noise level, $L_n$ ( dB )	58	53

\* 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所

\*\* 日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所 工学博士

\*\*\* Metglas, Inc. Ph. D

\*\*\*\* 株式会社日立産機システム

となる磁束密度，主にこの3つによって決定される。現在アモルファス変圧器においては据付面積を電磁鋼板変圧器と同等とすることが課題の一つであり，それを実現するには $B_m$ を現行のSA1材より向上する必要がある。これを達成するためFe基アモルファス材料の高 $B_s$ 化と低騒音化の検討を行った。本報では開発したFe基アモルファスHB1材の特性評価結果とHB1材を用いて試作した変圧器の評価結果について報告する。

② 実験方法

試料はMetglas, Inc.にて単ロール法を用いて作製した広幅薄帯(幅170mm×厚さ23-25 $\mu$ m) SA1材とHB1材を用いた。評価する際は規定の幅にスリットを行った試料を用いた。

相の同定，結晶化の有無はXRDで行い，結晶化温度 $T_x$ ，キュリー温度 $T_c$ は示差走査熱量計(DSC)で昇温速度0.167 /s，窒素雰囲気中条件で測定した。 $B_s$ は振動試料型磁力計(VSM)で磁界400 kA/m印加し測定した飽和磁化の値と密度より求めた。直流磁気特性は直流BHトレーサで，交流磁気特性は交流磁気測定器より測定した。評価試料形状は単板(長さ120×幅10 mm)とトロイダルコア(内径/外径/高さ: 70/75/5 mm)を用いた。騒音測定は暗騒音12-17 dBの無響室内でトロイダルコアを励磁し，磁束密度を変化させながら騒音計にて測定した。

③ 合金開発方針

図1に高 $B_s$ アモルファス材料の概念図を示す。一般的にFe基合金の $B_s$ を向上させるためにはFe量を増やす必要があるがFe基アモルファス合金の場合は0 Kにおける $B_s$ はFe量が多いほど大きくなるが $T_c$ が低下するため室温における $B_s$ はあるFe量で極大となる。

またアモルファス材料は準安定相であるため作製時のアモルファス形成能と熱安定性も考慮する必要がある。形成能が劣る材料はアモルファス材料の量産が困難であり，熱安定性が劣ると結晶化により軟磁性劣化を招く。この形成能と熱安定性はFe量を増やすと悪化する傾向にある。これらの点を考慮し高 $B_s$ アモルファスHB1材を決定した。

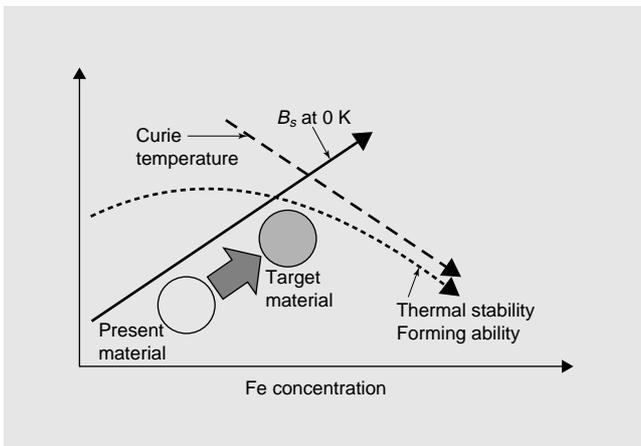


図1 高 $B_s$ 化概念図  
Fig. 1 Concept for development of high  $B_s$  amorphous material.

④ 評価結果

開発したHB1材を量産試作し，作製した170mm幅アモルファス合金薄帯試料を評価した結果を示す。

4.1 材料特性

表2にSA1材とHB1材の諸特性を示す。HB1材の飽和磁歪と電気抵抗率はSA1材とほぼ同等の値であるが $B_s$ が0.07 T向上し，保磁力が若干低減した。図2にSA1材とHB1材の50 Hzでの鉄損曲線を示す。 $B_s$ が向上したためSA1材が1.4 T付近より鉄損が大きく増加するのに対し，HB1材は1.55 T程度まで鉄損の急激な増加がなく，SA1材よりも $B_m$ の向上が期待できる結果を得た。

表2 HB1材とSA1材の特性  
Table 2 Property of HB1 and SA1 materials.

	HB1	SA1
Saturation induction, $B_s$ (T)	1.64	1.57
Coercivity, $H_c$ (A/m)	1.45	1.60
Magnetostriction, $\epsilon$ ( $10^{-6}$ )	28	28
Electrical resistivity( $\mu$ m)	1.19	1.25

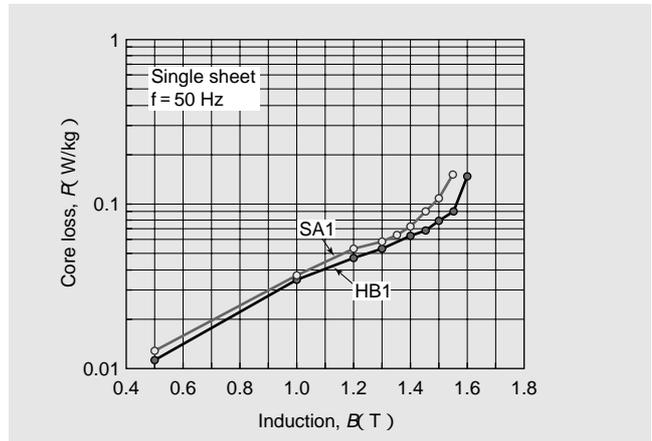


図2 SA1材とHB1材の鉄損曲線の磁束密度 $B$ 依存性  
Fig. 2 Magnetic induction,  $B$  dependence of core loss at 50 Hz for HB1 and SA1 materials.

4.2 騒音特性

Fe基アモルファス合金は飽和磁歪定数 $\epsilon_s$ が大きく，アモルファス変圧器は電磁鋼板変圧器よりも騒音が大きいことが指摘されている。そのため騒音を低減する一つの方法として $\epsilon_s$ を低減することが考えられる。しかしFe基アモルファスの $\epsilon_s$ は飽和磁化 $B_s$ の2乗に比例するため<sup>1)</sup>，高 $B_s$ 化と低 $\epsilon_s$ 化を同時に満たすことは困難である。そのため騒音に影響をおよぼす要因の検討を行った。図3にSA1材の磁化曲線と騒音レベルを示す。騒音が発生し始める領域は磁化曲線が屈曲する磁化回転領域であることがわかる。さらに図4に，熱処理により角形性を変えた3種の試料(色別して図示)の磁束密度に対する磁化曲線(実線)と騒音レベル(破線)を対比して示す。この結果より磁化曲線と騒音曲線が非常に類似した変化をすることがわかる。つまり磁化過程が磁壁移動の領域では騒音はほとんど発生せず，磁化回転領域で磁化が回転する際に磁歪による伸びが生じ，その振動により騒音が発生していると推定できる。このことより，磁化回転

領域がより高磁束密度域に存在する材料ほど騒音の発生しはじめる $B_m$ を高く設定することができると考え、HB1材の熱処理の最適化を行った。図5にSA1材とHB1

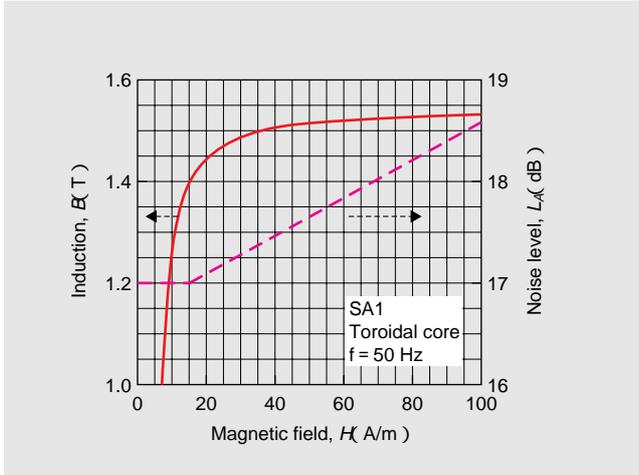


図3 SA1材の磁化曲線と騒音レベル曲線  
Fig. 3 Magnetization and noise curves at 50 Hz for SA1 material.

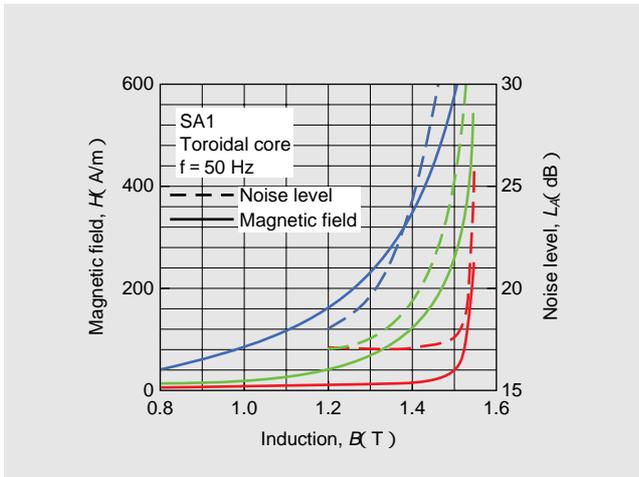


図4 角形性の異なるSA1材の磁化曲線と騒音レベル曲線  
Fig. 4 Magnetic field and noise level curves at 50 Hz for SA1 materials with different BH-loop squareness.

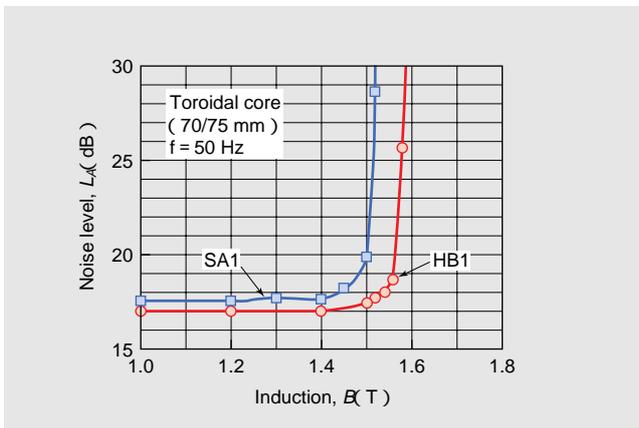


図5 HB1材とSA1材の騒音レベルの磁束密度依存性  
Fig. 5 Magnetic induction,  $B$  dependence of noise level,  $L_A$  at 50 Hz for HB1 and SA1 materials.

材を用いて試作したトロイダルコアの騒音曲線を示す。HB1材を用いたトロイダルコアはSA1材を用いたトロイダルコアよりも騒音レベルが立ち上がる磁束密度が0.1 T高磁束密度側にシフトしており、騒音の面からも $B_m$ 0.1 T向上が期待できることがわかった。

#### 4.3 実器変圧器評価

上記特性を示すHB1材を鉄心に用いて変圧器を作製し、変圧器での特性を評価した。作製した200 kVA 3相変圧器の外観概略図と鉄心サイズを図6に、50 Hzで励磁した場合の鉄損曲線を図7に示す。SA1材の設計磁束密度 $B_m$ は1.34 T、HB1材の $B_m$ は1.45 Tとなり、0.11 Tの $B_m$ 向上が可能である結果が得られた。図8に50 Hzで励磁した場合の騒音曲線を示す。騒音レベルは約10 dB低減しており、騒音を考慮した場合約0.15 Tの $B_m$ 向上が可能である。これらの結果を基に設計した2つのパターンのHB1アモルファス3相変圧器の特性を表3に示す。の設計例は小型化を狙い $B_m$ を1.45 Tで設計した場合の特性であり、据付面積を約10%低減でき電磁鋼板変圧器と同等にすることが可能であることがわかった。の設計例は低損失、低騒音化を狙い $B_m$ を現行と同じ1.34 Tで設計した場合の特性であり、総損失が約5%、騒音が約10 dB低減し、電磁鋼板変圧器の騒音と同等以下にできる見込みを得た。このようにHB1材を変圧器の鉄心材料に使用したアモルファス変圧器は、低損失変圧器として今後大きな期待ができると考えられる。

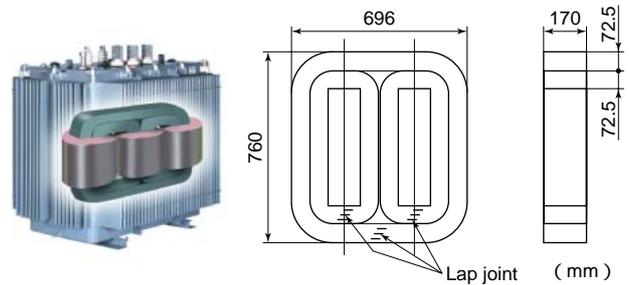


図6 試作変圧器の概観図と鉄心寸法  
Fig. 6 Core configuration of trial transformer.

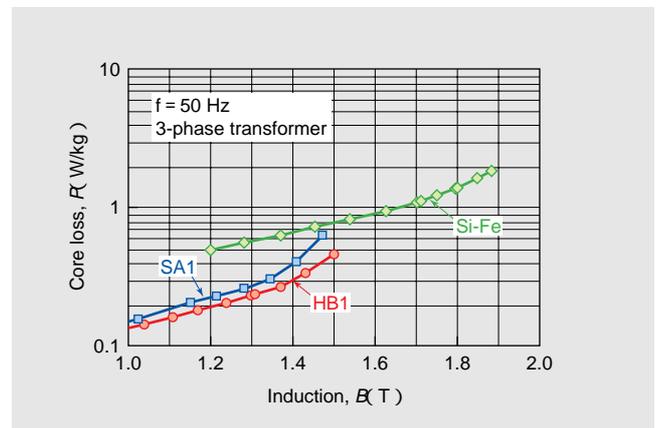


図7 3相変圧器の鉄損曲線  
Fig. 7 Core loss curves for 3-phase transformers.

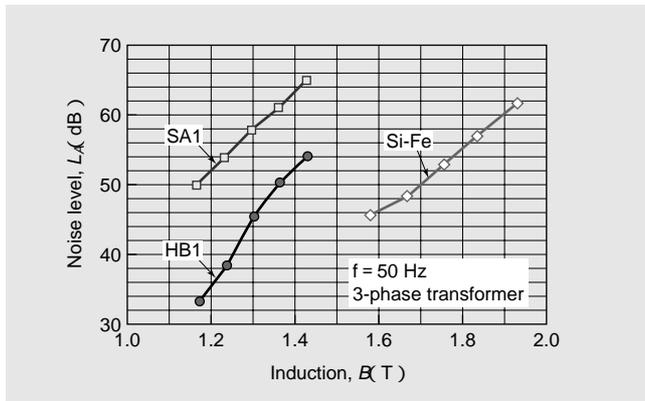


図8 3相変圧器の騒音曲線

Fig. 8 Noise level curves for 3-phase transformers.

表3 三相変圧器設計例

Table 3 Design example for 3-phase transformers.

	Fe-base amorphous			Grain-oriented silicon steel
	HB1		SA1	
Operating inducton, $B_m$ (T)	1.45	1.34	1.34	1.65
Foot space( % )	90	100	100	81
Total weight( % )	95	100	100	90
No-load loss( W )	220	180	220	685
Total loss( W $\times$ Load factor 40% )	1,212	1,172	1,212	1,364
Noise level, $L_A$ ( dB )	55	48	58	53

## 5 結 言

アモルファス変圧器の小型化を実現するために変圧器用のアモルファス材の高 $B_s$ 化と特性評価を行い、以下の結言を得た。

- (1)  $B_s = 1.64$  Tの高飽和磁束密度 ( $B_s$ ) アモルファスHB1材を開発した。
- (2) HB1材は現行SA1材より設計磁束密度を向上、騒音を改善できることがわかった。
- (3) 現行アモルファス変圧器より、HB1材を用いた変圧器は鉄損・騒音が低減するため、設計磁束密度の向上が可能であり、変圧器の据付面積を電磁鋼板変圧器と同等まで低減できる見通しを得た。

## 参考文献

- 1) R. Hasegawa, R. C. O'Handley, L. E. Tanner, R. Ray, and S. Kavesh: Appl. Phys. Lett., 29 ( 1976 ) 216.
- 2) F. E. Luborsky, H. H. Liebermann, J. J. Becker, and J. L. Walter: Rapidly Quenched Metals, 2 ( 1978 ) 188.
- 3) S. Hatta, T. Egami, and C. D. Graham. Jr. : IEEE Trans. Magn., 14 ( 1978 ) 1031.
- 4) M. Mitera, T. Masumoto, and N. S. Kazama: J. Appl. Phys., 50 ( 1979 ) 7609.
- 5) S. Hatta and T. Egami: J. Appl. Phys., 50 ( 1979 ) 1589.
- 6) 三寺, 大沼, 渡辺, 増本: 日本金属学会講演概要, ( 1975 ) p. 341.
- 7) T. Masumoto, K. Hashimoto, and H. Fujimori: Recent

Development of Research on Amorphous Metals, Sci. Rep. RITU, A25 ( 1975 ) 232.

- 8) K. Narita, H. Fukunaga, and J. Yanasaki: Suppl. To Sci. Rep. RITU, ( 1980 ) 251.
- 9) T. Sato, T. Ozawa, and M. Nagumo: Rapidly Quenched Metals, 2 ( 1982 ) 961.
- 10) Metglas, Inc. : 2605SA1 alloy Technical Bulletin.
- 11) S. Itoh, K. Aso, Y. Makino, and S. Uedaira: Appl. Phys. Lett., 37 ( 1980 ) 665.



小川雄一

Yuichi Ogawa

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所



吉沢克仁

Yoshihito Yoshizawa

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所  
工学博士



谷川茂穂

Shigeho Tanigawa

日立金属株式会社 先端エレクトロニクス研究所  
工学博士



Ryusuke Hasegawa

Metglas, Inc. Ph. D



稲垣勝敏

Katsutoshi Inagaki

株式会社日立産機システム



福井和元

Kazuyuki Fukui

株式会社日立産機システム



河島三晃

Mitsuaki Kawashima

株式会社日立産機システム