

## 三相ハイブリッド鉄心構造の磁束密度分布に関する検討

### Basic Study on Magnetic Flux Density Distribution in Three-Phase Hybrid-core Structure

小林千絵<sup>†</sup>・栗田直幸・小木瑞・西水亮・山岸明  
(株)日立製作所, 茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 (〒319-1292)

C. Kobayashi<sup>†</sup>, N. Kurita, M. Ogi, A. Nishimizu, and A. Yamagishi  
Hitachi Ltd., 1-1, Omika-cho, 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1292, Japan

To provide large-capacity transformers with a lower-loss and compact core, we devised a hybrid configuration consisting of amorphous wound- and silicon steel stacked-cores. In this study, we manufactured a small model of three-phase five-legged hybrid-core designed with conventional method and evaluated the distribution of magnetic flux density ( $B$ ). It was proved that the measured  $B$ -distribution could be reproduced reasonably with the calculated results using the magnetic circuit analysis. However, the hybrid-core has a challenge for capacity enlargement due to different yoke width between amorphous and silicon steel cores resulting in lower static stability. Hence, we proposed a shape of hybrid-core in which the both yoke widths were aligned to half that of the main-leg part. On the basis of magnetic circuit analysis, we demonstrated that the proposed hybrid-core enabled a 10% higher magnetic flux density than configurations with an amorphous core only, and the increase of iron loss against a conventionally designed hybrid-core was suppressed less than 0.8%.

**Key words:** hybrid core, three-phase five-legged transformer, iron loss

#### 1. はじめに

地球温暖化による環境問題の深刻化を背景に、パリ協定が採択され、具体的な温室効果ガス(Greenhouse Gas:GHG)の削減目標を示した。GHG 排出はエネルギー起源の CO<sub>2</sub> が大部分を占め、社会インフラとして欠かせない電力供給網における、エネルギーの有効利用と環境負荷低減が必要であり、構成する機器の高効率化が急務である。

構成機器の一つである変圧器では、損失の低い Fe 基アモルファス合金を鉄心材料に適用した、高効率の「アモルファス巻鉄心変圧器(Amorphous Wound Core Transformer: AMT)」が開発され<sup>1)</sup>、受電電圧 6.6 kV 級の配電用変圧器として広く採用されている。

一方、22 kV を超える特別高圧(特高)クラスの電力用変圧器は、損失は大きくなるが、大容量化が容易な珪素鋼板材を鉄心に用いた「珪素鋼板積鉄心変圧器(Silicon Steel Stacked Core Transformer: SST)」が主流である。

従って、特高クラスへ AMT が適用できれば大きな省エネルギー効果が期待できる<sup>2)</sup>。特に、変動負荷で低負荷率(20~40%)運転の再生可能エネルギー用途には特に大きな省エネルギー効果が期待できる<sup>3)</sup>。

アモルファス巻鉄心の損失は珪素鋼板積鉄心に比べて約 1/5 であるが、厚さ 25  $\mu\text{m}$  の薄帯状の素材を数千枚切斷・積層し、切斷端同士をラップ接合して環状に成形しており、鉄心単体の機械的強度が低く<sup>4,5)</sup>、大容量化にはその重量を支持する構造が別途必要となる。AMT の 5 MVA 以上への大容量化の試みはこれまでもなされているが<sup>6)</sup>、アモルファス材の飽和磁束密度(1.63 T)は珪素鋼板材(2.0 T)よりも約 20%低いことから、同仕様の SST に比べて AMT の筐体体積が増加する。一方、大容量器に採用されている珪素鋼板材は飽和磁束密度と機械的強度が高いが、損失がアモル

ファス材より大きい<sup>7)</sup>。従って、アモルファス材と珪素鋼板材を組み合わせたハイブリッド鉄心の適用により、両材料の利点を活かした変圧器を製作できる可能性がある。

ハイブリッド鉄心は、各々の飽和磁束密度と透磁率の違いにより、特徴的な磁束の振る舞いが発生する。低磁束密度では、磁束は主に透磁率が高いアモルファス巻鉄心に流れ、磁束密度が高くなるとアモルファス巻鉄心が飽和して珪素鋼板積鉄心に磁束が流れる。これにより、アモルファス巻鉄心の過飽和が回避されることから、AMT より定格磁束密度を高く設計でき、同仕様の AMT より小形、かつ SST より低損失な HBT が実現できる。

これまで、グレードの異なる珪素鋼板材で鉄心を構成した変圧器の設計方法や試作試験結果が報告されているが<sup>8-10)</sup>、異なる鉄心材料を組み合わせた変圧器の試作例はほとんどない。我々は、これまでにアモルファス材と珪素鋼板材を組み合わせた、5 MVA 単相ハイブリッド鉄心変圧器(Hybrid-core Transformer: HBT)を設計・試作し、同仕様の AMT に対して 10%の高磁束密度化と 8%の小形化を実証した<sup>11)</sup>。単相 HBT では、アモルファス材と珪素鋼板材の利点を活かした変圧器の成立性が確認されたが、更に大容量化を見据えた場合、三相 HBT の検討が必須である。

そこで大容量化の検討のため、三相五脚 HBT の小型モデル鉄心を製作し、磁気特性を評価した。三相 HBT では、U 相、V 相、W 相の巻線に位相が互いに 120°ずれた励磁電圧が印加されるため、各磁脚に分担される磁束密度は単相鉄心と異なり複雑な挙動を示す<sup>12)</sup>。従って、単相 HBT の設計手法が適用できない懸念がある。

さらに、ハイブリッド化した際の鉄心形状についても課題がある。三相五脚鉄心の理想的な形状は、U、V、W 相の脚部の断面積 1 に対してヨーク部を  $1/\sqrt{3}$  とした形状である<sup>13)</sup>。五脚鉄心は磁束が主脚と側脚に分担され、ヨーク部が主脚と同じ断面積を要しな

いためである。しかし、アモルファス巻鉄心は長尺の薄帯を巻回して形成するため、鉄心の一部分のみの厚さを変更できない。つまり、巻鉄心で三相五脚鉄心を形成した場合、主脚の幅は2個並列に並べた巻鉄心の厚さとなり、ヨーク幅は主脚の1/2幅となる。従って、珪素鋼板積鉄心とアモルファス巻鉄心を用いて三相五脚HBTを構成する場合、両鉄心のヨーク幅が異なる構成となる。ヨーク部の幅が異なるハイブリッド構成では、アモルファス鉄心のみを支持する部材が必要になるなど、強度、製造コスト等の観点から大容量化には適さない。そこで、アモルファスと珪素鋼板の両鉄心のヨーク幅を主脚の1/2に揃え、静置安定性を向上させたハイブリッド鉄心を提案する。

本論文では上記の提案形状の妥当性の実証のため、まず、ヨーク部の幅が主脚の1/3の珪素鋼板積鉄心と、1/2のアモルファス巻鉄心を組み合わせた、従来の考え方によるハイブリッド鉄心内の磁束密度( $B$ )分布を、小容量モデルを用いて実測した。次に、ニューラルネットワークを利用した回路シミュレータATP(Alternative Transient Program)<sup>14</sup>を用いた磁気回路解析により、上記のモデル鉄心内の磁束分布を求め、実測結果との比較により解析モデルの妥当性を評価した。尚、ATPは3次元有限要素法(FEM)電磁界解析よりも短時間で解析可能であるため、十分な精度を得られれば、本検討のように形状変更による磁束密度分布の評価には適しているため選定した。最後に、ヨーク幅を1/2に揃えた、提案する形状のハイブリッド鉄心の成立性を磁気回路解析により検討した。

## 2. モデル鉄心の構造

Fig.1に、三相五脚ハイブリッド鉄心の小容量モデルを示す。アモルファス巻鉄心<sup>15</sup>は、薄帯幅が170mmの鉄心を4つ組み合わせて三相五脚とする。アモルファス巻鉄心群の積層面の上部に、図中に示した珪素鋼板材からなる額縁型積鉄心を備える。アモルファス巻鉄心のヨーク部の幅は主脚部の1/2であり、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅は1/3である。珪素鋼板積鉄心は台形の珪素鋼板をステップラップ接合させて三相五脚鉄心の形状とした。そのため、隣接する珪素鋼板間には0.1~0.2mm程度の空隙(エアギャップ)が生じる。

モデル鉄心は、アモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の実効断面積比率が約8:2のハイブリッド構成とした。両鉄心の材料比率については、単相HBTに対する検討より<sup>11</sup>、珪素鋼板の比率を2割以下とすると、鉄損が珪素鋼板のみで構成した鉄心より50%以上低減できる結果を得ている。一方、小型化の観点からは飽和磁束密度の高い珪素鋼板の割合を多くするほど有利なため、損失と鉄心サイズのトレードオフからこの比率を決定した。なお、木枠で珪素鋼板積鉄心の重量を支持することで、加重応力によるアモルファス巻鉄心の鉄損増加の影響を排除した<sup>16</sup>。

ハイブリッド鉄心は、U脚、V脚、W脚の3本の主脚部にアモルファス、珪素鋼板両鉄心に渡って巻回した巻数 $N$ の励磁用巻線に周波数 $f = 50$  Hzの三相正弦波電圧を印加して励磁した。ハイブリッド鉄心全体で平均した励磁磁束密度 $B_m$ は、励磁用巻線に重

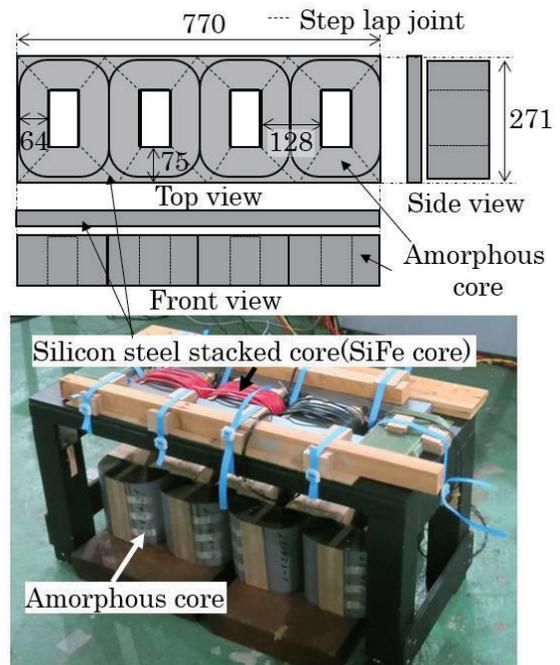


Fig. 1 Photographs of hybrid core for excitation tests (Unit: mm).

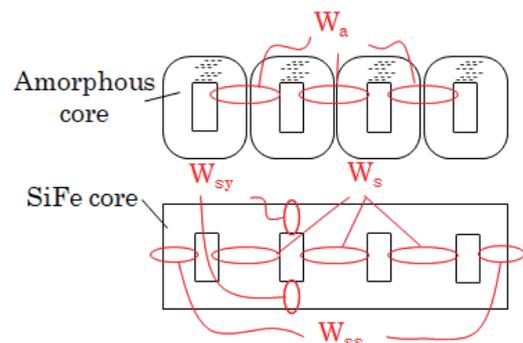


Fig. 2 Set-up of search coils in cores for excitation tests.

ねて巻いた巻数 $N$ のサーチコイルに発生する電圧実効値を $V_{eff}$ 、アモルファスと珪素鋼板鉄心の実効断面積の和を $A_c$ として、

$$B_m = V_{eff} / 4.44 f N A_c, \quad (1)$$

から求めた。

またFig. 2に示すように、モデル鉄心の各部位にサーチコイルを巻回し、磁束密度 $B$ の分布を評価した。 $W_a$ はアモルファス巻鉄心の主脚、 $W_s$ は珪素鋼板積鉄心の主脚、 $W_{ss}$ は珪素鋼板積鉄心の側脚、 $W_{sy}$ は珪素鋼板積鉄心のヨーク部に巻回したサーチコイルである。各サーチコイルで発生する電圧より鉄心の各部位の $B$ を求めた。

## 3. 磁気特性の評価結果と考察

### 3.1 磁束密度分布の評価結果

Fig. 3にモデル鉄心の励磁磁束密度 $B_m$ に対する各鉄心内の $B$ の変化を示す。Fig. 3(a)にはU脚、V脚、W脚のアモルファス

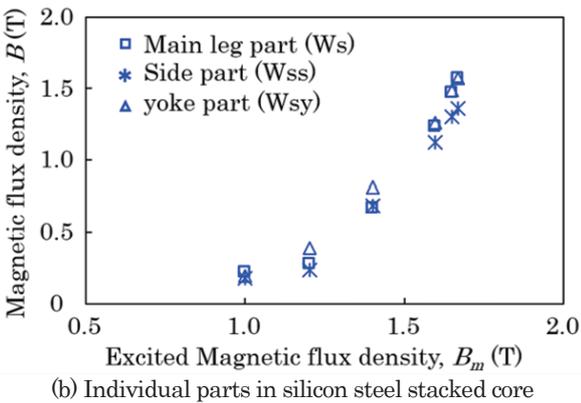
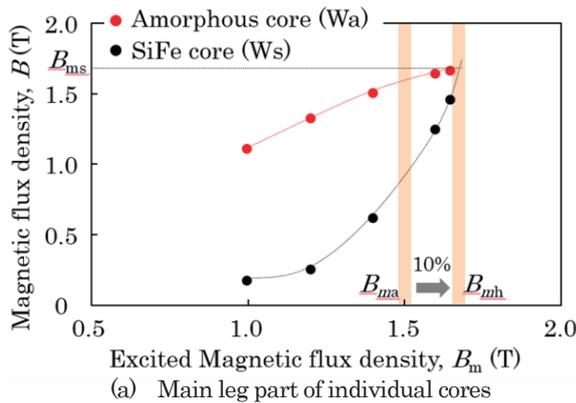


Fig. 3 Measured  $B$  distribution in the hybrid model core.

巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の  $B$  の平均値を、Fig. 3 (b) には珪素鋼板積鉄心内の主脚、ヨーク部、側脚の  $B$  の平均値を示す。Fig. 3 (a) において、励磁中の磁束がアモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の各磁気抵抗に応じて分担される現象がみられた。低磁束密度側では磁気抵抗の小さいアモルファス巻鉄心に多くの磁束が流れ、飽和に近づくとき、珪素鋼板積鉄心の磁束密度が急増する。つまり、三相鉄心も単相鉄心と同様に、 $B_m$  に伴う磁気抵抗の変化に応じて磁束が分担されることがわかった。一般的に、アモルファス巻鉄心のみで構成される AMT の設計磁束密度  $B_{ms}$  は、飽和磁束密度に対して尤度を持った値に設定する。これは飽和による励磁電流の急増を抑制するためである。これに対してハイブリッド鉄心の場合、励磁磁束密度  $B_m$  をアモルファス巻鉄心の飽和磁束密度付近まで増加させても、珪素鋼板積鉄心に磁束が分担されるため、過大な励磁電流は流れない。従って HBT の設計磁束密度は、珪素鋼板積鉄心内の磁束密度が SST の設計磁束密度  $B_{ms}$  に達するまで高くできる。例えば Fig.3 (a) において、AMT で  $B_{ms} = 1.50$  T であった設計磁束密度を、HBT では  $B_{mh} = 1.65$  T に設定できる。Fig. 3 (a) の結果より、アモルファス巻鉄心のみで鉄心を構成するよりも約 10% の高磁束密度化が見込める。また、Fig. 3 (b) では珪素鋼板積鉄心の主脚、ヨーク部、側脚の  $B$  の差は最大 0.2 T であった。この珪素鋼板積鉄心の  $B$  の差分はステップラップ接合部のエアギャップの製作時のばらつきに起因すると考えられる。

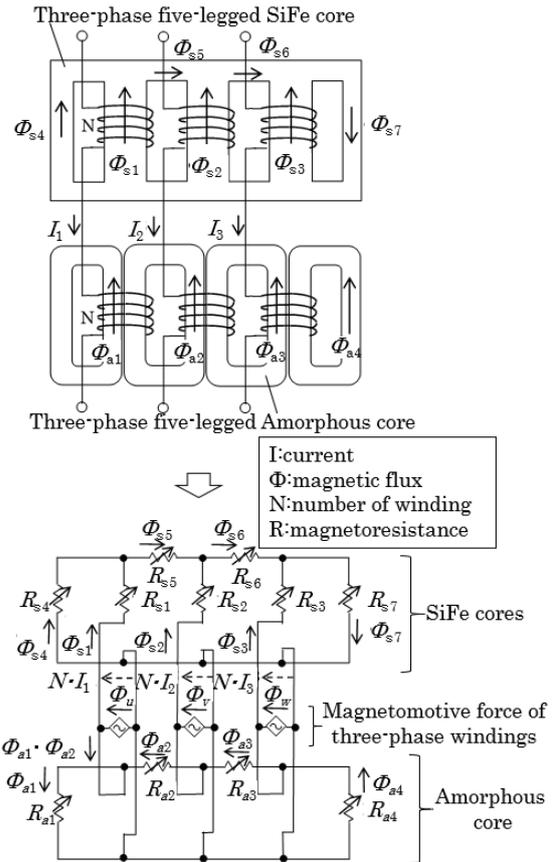


Fig. 4 Wiring diagram(upper) and equivalent magnetic circuit(lower) of the investigated three-phase hybrid-core.

### 3.2 ATP による磁気回路解析

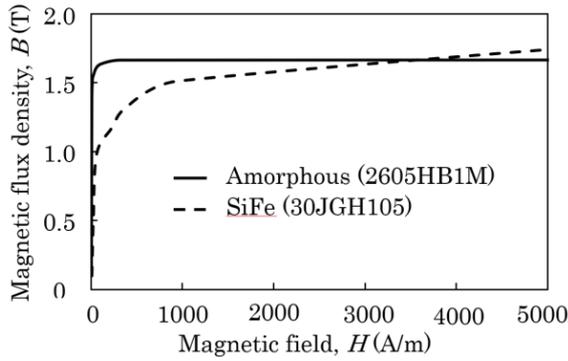
汎用回路シミュレータである ATP を用いた磁気回路解析により、ハイブリッド鉄心内の  $B$  分布を求め、前節で示した実測結果と比較した。Fig. 4 に三相五脚ハイブリッド鉄心の励磁回路の結線図と等価磁気回路を示す。アモルファス巻鉄心は、1 つの巻鉄心に相当する磁気抵抗 4 つを組み合わせて、珪素鋼板積鉄心は、脚部とヨーク部を別個の磁気抵抗で模擬した。そして両鉄心に相当する磁気回路に、共通の三相電圧源(起磁力源)を接続した。なお、回路シミュレータによる鉄心内の磁束解析法として、実測に基づいた各鉄心の磁気飽和を考慮した磁化特性 (Fig. 5) を、非線形抵抗回路網で模擬する方法を採用した。また、磁気抵抗で模擬した各鉄心部位の断面積および磁路長を Table 1 に示す。

磁気回路方程式より、磁束  $\Phi$  (Wb) および磁気抵抗  $R$  (A/Wb) は、以下の式 (2) および (3) よりあらわされる。 $S$  (m<sup>2</sup>) は断面積、 $L$  (m) は磁路長、 $\mu$  (H/m) は透磁率、 $H$  (A/m) は磁界である。

$$NI = R\Phi \quad (2)$$

$$R = LS/\mu = HLS/B = NI/\Phi \quad (3)$$

ハイブリッド鉄心の三相の主脚部の磁束  $\Phi_u$ ,  $\Phi_v$ ,  $\Phi_w$  は、Fig. 4 上部の結線図中に示した鉄心各部の磁束を用いて、以下の式であらわされる。アモルファス巻鉄心の主脚は隣接する巻鉄心で構成されているため、その差分であらわされる。



**Fig. 5**  $BH$  curves of 2605HB1M amorphous and 30JGH105 silicon steel materials used for ATP.

**Table 1** Specifications of the investigated three-phase hybrid-core.

Name		Effective cross sectional area $S(\text{m}^2)$	Magnetic path length $L(\text{m})$
SiFe	Main leg part	$2.24 \times 10^{-3}$	0.195
	Yoke part	$1.30 \times 10^{-3}$	0.384
	Side yoke	$1.14 \times 10^{-3}$	0.581
Amorphous		$9.59 \times 10^{-3}$	0.574

$$\Phi_i = \Phi_{s1} + \Phi_{a1} - \Phi_{s2} \quad (4)$$

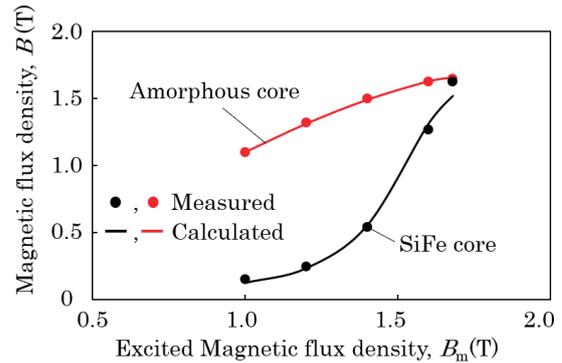
$$\Phi_r = \Phi_{s2} + \Phi_{a2} - \Phi_{s3} \quad (5)$$

$$\Phi_w = \Phi_{s3} + \Phi_{a3} - \Phi_{a4} \quad (6)$$

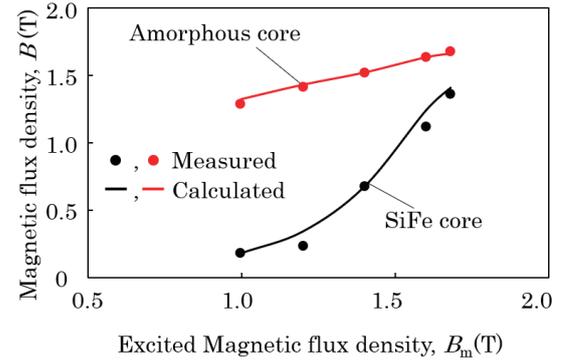
次に、ハイブリッド鉄心を三相励磁した場合の  $B$  分布を ATP で解析し、実測結果と比較した。解析した励磁磁束密度  $B_m$  は 1.0 ~ 1.6 T の範囲とした。ハイブリッド鉄心の  $B_m$  に対する各鉄心内の磁束密度の実測結果と解析結果の比較を Fig. 6 に示す。同図 (a) はアモルファス巻鉄心の主脚と珪素鋼板積鉄心の主脚の  $B$  を、同図 (b) はアモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心のヨーク部の  $B$  を示している。そして同図 (c) は、アモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の側脚の  $B$  である。Fig. 6 (a) より、主脚の  $B$  分布は実測と解析で誤差 0.04 T 以内で一致した。また、Fig. 6 (b) のヨーク部、Fig. 6 (c) の側脚においては実測と解析での誤差は最大 0.12 T であった。これらのずれの原因は、鉄心の製作誤差を解析で考慮していないためと考えられる。珪素鋼板積鉄心のステップラップ接合部にできる 1~2 mm のエアギャップの精度管理は難しく、磁束密度分布の誤差の大きな要因となり得る。特にヨーク部は接合箇所が多いため、誤差が大きくなったと考えられる。Fig. 6 に示した結果より、Fig. 4 に示す磁気回路を用い、三相五脚ハイブリッド鉄心内の  $B$  分布を良好に再現できることが示された。そこで次に、大型化に適したハイブリッド鉄心の構造について検討した。

### 3.3 鉄心構造変更による磁気特性への影響

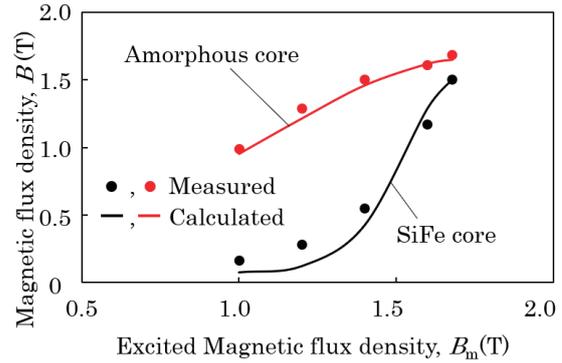
これまで示した、アモルファス、珪素鋼板両鉄心のヨーク幅が異なる形状では、強度、製造面から大容量化には適さない。珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅をアモルファス巻鉄心と同じく主脚部の



(a) Main leg part of cores



(b) Yoke part of cores



(c) Side leg part of cores

**Fig. 6** Comparison of measured and calculated  $B$  distribution in the three-phase hybrid model core.

1/2 とした場合、強度・製造コスト面の問題は改善されるが、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の磁束密度が高くなり、過飽和や鉄損の増加を招く懸念がある。また、HBT としての設計磁束密度は、飽和磁束密度の高い珪素鋼板積鉄心の磁束密度に依存する。従って、珪素鋼板積鉄心内の  $B$  の増加量が許容値を超えた場合、設計磁束密度を下げざるを得なくなる。そこで本節では、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅を主脚部の 1/3 から 1/2 に変更した場合の  $B$  分布および鉄損特性の変化について、ATP 解析を用いて評価した。

まず、Fig. 4 で作成した磁気回路のパラメータを用いて、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅を主脚部の 1/3 から 1/2 に変更した場合の  $B$  分布を解析した。さらに、各鉄心の鉄損特性から、ハイブリッド鉄心全体の鉄損値を計算した。ハイブリッド鉄心の  $B_m$  に対する各鉄心内の  $B$  の解析結果を Fig. 7 (a) に、鉄損特性を Fig. 7 (b) に示す。

Fig. 7 (a) より、 $B_m$  の増加に伴い、珪素鋼板積鉄心内の  $B$  分布は、ヨーク部よりも主脚が高くなる傾向を示した。例として、 $B_m$

=1.68 Tに着目すると、珪素鋼板積鉄心のヨーク幅を主脚の1/2にした場合、ヨーク部の $B$ は1.50 Tから1.51 Tへ、0.01 T増加する。一方、珪素鋼板積鉄心の主脚の $B$ は1.52 Tから1.51 Tへ、0.01 T減少する。従って、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅を主脚部の1/2とした場合、ヨーク部の $B$ は増加するものの主脚部の $B$ 以下に留まるため、設計磁束密度への影響はないことが分かった。また、磁束が変化した要因として、ヨーク部の幅を減らしてその $B$ が増加した結果、珪素鋼板積鉄心の磁気抵抗が増加したことも挙げられる。ハイブリッド鉄心内の $B$ の分担はアモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心の磁気抵抗のバランスで決定されるため、珪素鋼板積鉄心の磁気抵抗が増加した結果、アモルファス巻鉄心側により多くの磁束が流れ、結果として珪素鋼板積鉄心の主脚の磁束密度が減少したと考えられる。

次にFig. 7(b)より、珪素鋼板積鉄心のヨーク部を主脚の1/2幅とした場合、ハイブリッド鉄心全体の鉄損値の変化は最大0.8%と、ほぼ影響しないことがわかった。

以上の結果から、珪素鋼板積鉄心のヨーク幅を1/2にしても珪素鋼板、アモルファス両鉄心の $B$ の顕著な増加は現れず、かつ鉄損の変化は0.8%以内であることがわかった。これは、鉄心の物量低減による鉄損の低減効果と、ヨーク部の $B$ の増加に伴う鉄損増加が相殺されたためと考えられる。従って、大容量器を製作する場合には、剛性と製造の観点から珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅を主脚部の1/2としても、HBTとして成立すると結論される。

#### 4. まとめ

大容量三相変圧器へアモルファス巻鉄心と珪素鋼板積鉄心を組み合わせたハイブリッド鉄心を適用するため、三相モデル鉄心を製作し、磁束密度 $B$ の分布を評価した。さらに、ATPを用いた磁気回路解析によりハイブリッド鉄心内の $B$ 分布と鉄損を評価し、以下の結果を得た。

(1) 三相ハイブリッド鉄心の $B$ 分布は励磁磁束密度 $B_m$ の増加に伴い珪素鋼板積鉄心の $B$ が増加し、アモルファス巻鉄心の過飽和を防ぐ効果が現れた。従って、アモルファスのみで構成した鉄心に比べて約10%の高磁束密度化が可能であることがわかった。

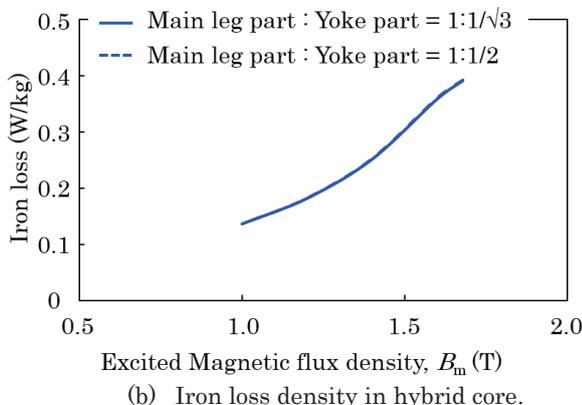
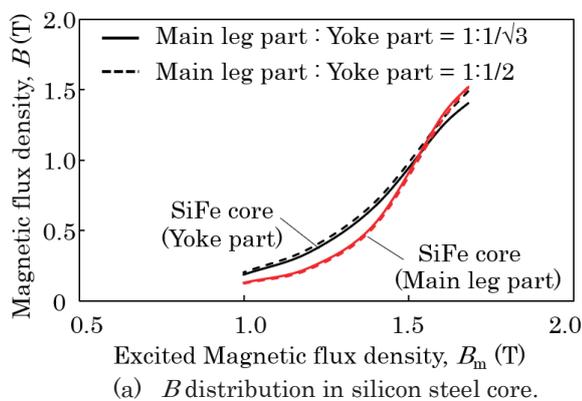
(2) ハイブリッド鉄心の大容量化において、製造、剛性の観点から有利と考えられる形状として、珪素鋼板積鉄心のヨーク部の幅を主脚部の1/2とし、アモルファス巻鉄心と揃える形状を提案した。モデル鉄心の実測結果に基づき構築した磁気回路解析により、提案形状のハイブリッド鉄心において、鉄損の増加率は0.8%以下に留まり、HBTとしての成立性を示した。

**謝辞** 本成果は2015年度から2017年度の環境省CO<sub>2</sub>排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業における助成のもと得られたものである。

#### References

- 1) K. Inagaki, M. Kuwabara, K. Sato, K. Fukui, S. Nakajima, and D. Azuma: Hitachi Hyouron, **93**, no. 2, 73 (2011) (in Japanese).
- 2) S. Yurekten, A. Kara, and K. Mardikyan: Proc. of Inter. Conf. on Renewable Energy Research and Applications, 534, 2013.
- 3) M. Carlen, D. Xu, J. Clausen, T. Nunn, R. Ramanan, and D. M. Getson: Proc. of IEEE PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition, 2010.
- 4) K. Sato: Jitsumu Hyoumen Gijutsu, **28**, 556, (1981) (in Japanese).
- 5) Hitachi Metals Corp.: Catalogue No.HJ-B13-A (2015).
- 6) Y.-H. Chang, C.-H. Hsu, and C.-P. Tseng: Proc. 9th World Sci. Eng. Acad. Soc. (WSEAS), 78 (2009).
- 7) JFE steel Corp.: Catalogue No.F1J-001-05 (2019).
- 8) A.J. Moses and S. Hamadeh: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5379 (1988).
- 9) D. Snell and A. Coombs: *J. Magn. Magn. Mater.*, **254-255**, 349 (2003).
- 10) T.D. Kefalas, P.S. Georgilakis, A.G. Kladas, A.T. Souflaris, and D.G. Paparigas: *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 1082 (2008).
- 11) N. Kurita, A. Nishimizu, C. Kobayashi, Y. Tanaka, A. Yamagishi, M. Ogi, K. Takahashi, and M. Kuwabara: *IEEE Trans. Magn.*, **54**, No.11, 8400604 (2018).
- 12) K. Shinya and K. Saitoh: *IEEEJ Trans. IA*, **123**, 732 (2003) (in Japanese).
- 13) T. Takeuchi: *Denki Sekkeigaku* (in Japanese), (Ohmsha, Tokyo, 1993).
- 14) E. Rosolowski, P. Stakhiv: proceedings of the IEEE Electric Power Networks 2016.
- 15) K. Takahashi, D. Azuma, and R. Hasegawa: *IEEE Trans. Magn.*, **49**, 4001 (2013).
- 16) N. Kurita, A. Nishimizu, H. Morooka, C. Kobayashi, N. Miyamoto, Y. Hamadate, T. Ishigami, Y. Yamada, K. Sasaki, T. Satake, and T. Fukuyama: *IEEEJ Trans. PE*, **138**, 53 (2018) (in Japanese).

2020年12月27日受理, 2021年2月11日再受理, 2021年3月4日採録



**Fig. 7** Comparison of calculated  $B$  distribution and iron loss density between two types of hybrid core.