

博士学位論文要約（令和4年3月）

## 鉄基アモルファス合金と珪素鋼板からなる 大容量ハイブリッド鉄心変圧器に関する研究

小林 千絵

指導教員：中村 健二

### A Study on Large Capacity Hybrid Core Transformers constructed from Iron-based Amorphous Alloy and Silicon Steel

Chie KOBAYASHI

Supervisor: Kenji NAKAMURA

In this study, we discussed increasing the capacity of low-loss amorphous transformers. Amorphous transformers have low loss, but low stiffness, saturation flux density, and space factor. Therefore, amorphous transformers are not suitable for large capacities. Comparing transformers of the same capacities, the lower the saturation flux density, the larger the required core cross-sectional area. Also, the winding of the large-capacity transformer is circular, but the cross section of the amorphous core is rectangular. Therefore, since the square core is inserted in the circular winding, the space utilization of the core in the winding is low. In addition, the amorphous core cannot stand on its own, and its shape is deformed by its own weight. Thus, in order to increase the capacity of transformers using amorphous cores, we proposed a hybrid of amorphous cores and silicon steel cores.

#### 1. はじめに

一般的に変圧器の鉄心材料には、珪素鋼板などの軟磁性材料が採用されている。一方、損失が珪素鋼板の1/3~1/4であるアモルファス変圧器も一部採用されている<sup>1)</sup>。アモルファス変圧器は低損失であるが剛性、飽和磁束密度、占積率が低く、大容量化には不向きであり、量産化されているのは3 MVA以下の小容量器である。飽和磁束密度が低い鉄心で同じ容量の変圧器を製作する場合、より大きな鉄心断面積が必要となる。さらに、アモルファス鉄心は薄い薄帯を数千枚重ねて成形しているため、鉄心を起立させた場合には自立することができず、鉄心の荷重で形状が変形してしまう。

そこで、アモルファスの低損失、珪素鋼板の高い飽和磁束密度・自立可能な機械的強度という両者の利点を活かす、それらを組み合わせた「ハイブリッド鉄心変圧器」について検討した。ハイブリッド化により変圧器内では磁束の分担が変化し、例えば低磁束密度領域では透磁率が高く磁気抵抗の小さいアモルファス鉄心により多くの磁束が流れ、低鉄損化が期待される。一方、高磁束密度領域ではアモルファス鉄心の透磁率が下がり、磁気抵抗が大きくなるため、方向性珪素鋼板により多くの磁束が流れ、磁気飽和による過電流を防ぐ効果が期待される。その結果、アモルファス変圧器よりも、設計磁束密度を高くできる可能性がある。また、珪素鋼板積鉄心により剛性を上げることで、自立可能な変圧器を実現できる

可能性がある。しかしながら、ハイブリッド鉄心変圧器における最適なアモルファス鉄心と方向性珪素鋼板鉄心の比率は不明である。また、実用上、剛性が十分高く、自立可能なハイブリッド鉄心変圧器の構造や製作方法についても明らかにする必要がある。さらに、本ハイブリッド変圧器は電力系統用であることから、三相五脚変圧器への適用可能性についても明らかにする必要がある。つまり、ハイブリッド鉄心変圧器を成立させるための課題は、アモルファスの低損失を維持した上で、設計磁束密度および巻線内の鉄心占有率の向上と自立可能な鉄心構造の提案である。

以上のことから本研究の目的は、低損失で鉄心の大型化を抑制する大容量変圧器を提案し、試作と実験によってその効果を検証することであり、CO<sub>2</sub>削減へ貢献することである。

#### 2. 5 MVA 単相ハイブリッド鉄心変圧器の開発

本章では、まず、ラップ接合したアモルファス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の磁気特性と最適な材料比率について検討するとともに、大容量器の実現可能性について検証を行った<sup>2)</sup>。図1に、アモルファス鉄心と珪素鋼板積鉄心を組み合わせたモデル鉄心を対象に、計算と実測による磁束密度分布を評価した結果を示す。同図より、アモルファス鉄心が飽和磁束密度に近づくにつれて、ハイブリッド鉄心内の珪素鋼板積鉄心の磁束密度の分担が高くなり、アモルファス鉄心の磁気飽和を抑制する効果が得られる

ことが明らかとなった。図2に、電磁界解析を用いて、ハイブリッド鉄心内の珪素鋼板積鉄心の比率に対する鉄心総体積および鉄損の変化を調べた結果を示す。同図より、珪素鋼板積鉄心の比率に対して体積は単調に減少するが、鉄損は逆に増加し、両者の間にはトレードオフの関係があることが明らかとなった。本論文では、アモルファス鉄心よりも10%程度実効断面積を小さくでき、かつ鉄損を珪素鋼板積鉄心の半分以下とできるおおよそ8:2を最適な材料比率とした。次いで、基礎検討の結果を踏まえて、5 MVA 単相ハイブリッド鉄心変圧器を試作、評価した。

図3に試作した変圧器の外観と中身の概要を示す。図4に、無負荷試験にて評価した試作ハイブリッド鉄心変圧器の励磁率と電圧歪み率  $d_f$  の関係を示す。JEC2200 基準に適合するには、110%過励磁における  $d_f$  が3.0%以下を満たす必要がある。 $B_m = 1.53$  Tとした場合、励磁率110%において  $d_f$  は約2.8%であり、この条件を満たす。単相アモルファス変圧器で設計される磁束密度の上限値は約1.4 T~1.45 Tであるため、鉄心のハイブリッド化により高磁束密度設計が可能であることが実証された。また、図5に、定格  $B_m = 1.53$  Tにおけるハイブリッド鉄心変圧器の単位重量あたりの鉄損の励磁率特性を示す。また同図中には、比較として従来の7.5 MVA 単相珪素鋼板変圧器(定格  $B_m \approx$

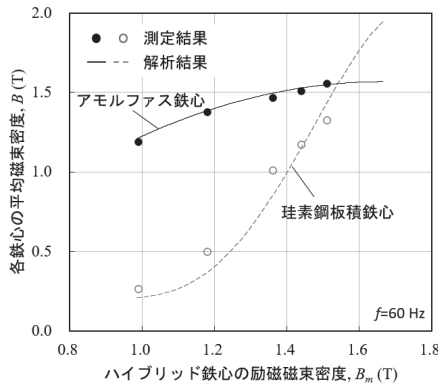
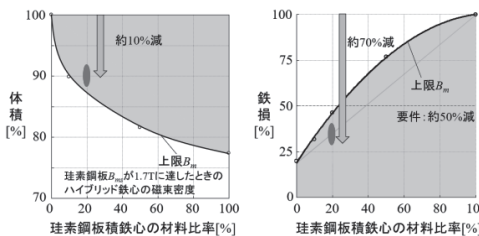


図1 ハイブリッド鉄心の励磁磁束密度に対する各鉄心の磁束密度



(a) 比率に対する断面積 (b) 比率に対する鉄損  
図2 ハイブリッド鉄心の材料比率に対する特性

1.7 T)の鉄損を示した。両者の鉄損を比較するため、鉄心重量で各々の鉄損を規格化した。同図から明らかのように、試作したハイブリッド鉄心変圧器の鉄損は従来の珪素鋼板変圧器より小さく、励磁率100%(定格  $B_m$  で励磁)における鉄損は0.69 W/kgであった。したがって、珪素鋼板変圧器の1.95 W/kgより65%低減され、鉄損を大きく低減可能であることが明らかとなった。さらに、巻線内の鉄心の空間利用率を向上させることで、筐体体積をアモルファス変圧器に比べて約8%の小形化が見込めることがわかった。また、脆弱なアモルファ

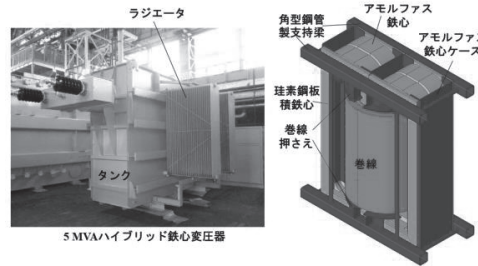


図3 5 MVA ハイブリッド鉄心変圧器の概要

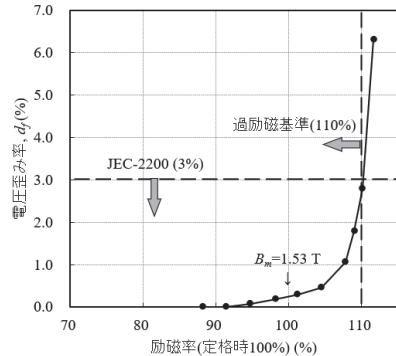


図4 試作ハイブリッド鉄心変圧器の励磁率と電圧歪み率

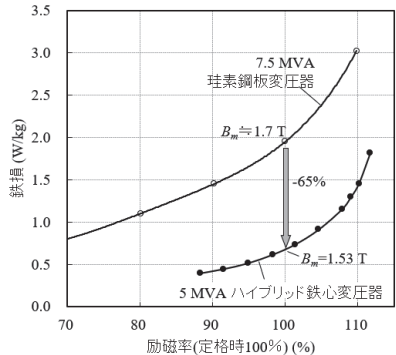


図5 試作ハイブリッド鉄心変圧器の励磁率に対する損失

ス鉄心を珪素鋼板積鉄心で挟んだアルミニウムケース内に収納し、製造時の損傷から保護する構造と製法を考案し、実用機器が製作可能であることを実証した。以上のことから、ハイブリッド鉄心を用いることで、高磁束密度化による小形化と損失低減が可能なが 5 MVA 単相器において実証された。

### 3. 三相五脚ハイブリッド鉄心の最適構成に関する検討

本章では、大容量化を見据えた場合に必須となる三相器の検討を行った<sup>3)</sup>。前章では単相器を考察対象としたが、電力系統用では三相器の検討が必須である。特に三相五脚変圧器は、U V W 相の主脚の断面積 1 に対してヨークを  $1/\sqrt{3}$  とするのが一般的であるが、アモルファス鉄心は脚とヨークで厚さを変えることができないため、主脚の断面積 1 に対してヨークは  $1/2$  となる。また、環状の 4 つのアモルファス鉄心を横一列に並べた構造になるため、個々の鉄心間の磁束渡りが起きにくく、変圧器内の磁束の分布が通常の三相五脚変圧器とは異なることが予想される。

そこで、三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器のモデル鉄心を製作し、磁束の分担について検証を行った。図 6 に、試作した三相五脚ハイブリッド鉄心の励磁磁束密度に対する各鉄心の主脚の平均磁束密度を示す。同図より、三相五脚ハイブリッド鉄心においても励磁磁束密度の増加に伴い、アモルファス鉄心と珪素鋼板積鉄心の磁束の分担が適切に変化し、アモルファス鉄心の磁気飽和に伴う過電流を防ぐこと、並びに、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明らかとなった。

次いで、大容量器に適した鉄心形状を提案するため、三相五脚ハイブリッド鉄心の簡易磁気回路解析モデルを導出した。導出した磁気回路モデルから算定された計算値は実測値と良好に一致したことから、磁気回路モデルの妥当性が明らかになった。さらに、本磁気回路モデルを用いて、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の断面積を主脚の  $1/2$  とし、アモルファス鉄心とそろえた形状を提案した。

図 7 に、三相五脚ハイブリッド鉄心における珪素鋼板積鉄心のヨーク断面積の違いに対する珪素鋼板積鉄心各部の磁束の分担の磁気回路解析結果を示す。また、図 8 に三相五脚ハイブリッド鉄心における珪素鋼板積鉄心のヨーク断面積の違いに対する鉄損を示す。図 7 および図 8 の結果より、珪素鋼板積鉄心のヨークの断面積を主脚の  $1/2$  としても適切な磁束の分担が行われ、鉄損についてもほとんど変わらないことが明らかとなった。

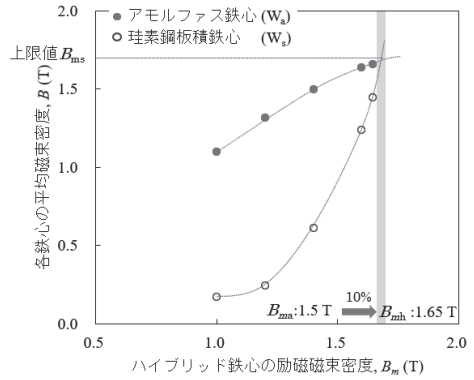


図 6 励磁磁束密度に対する各鉄心の主脚の平均磁束密度

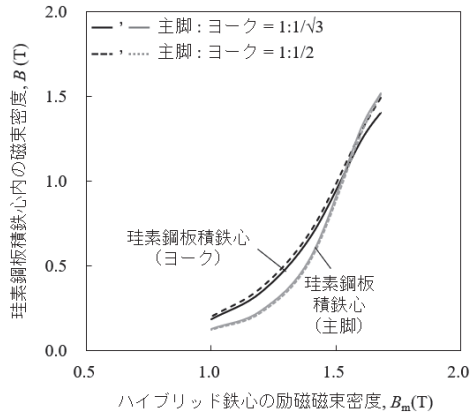


図 7 ヨーク断面積の違いに対する珪素鋼板積鉄心の磁束密度の磁気回路解析結果

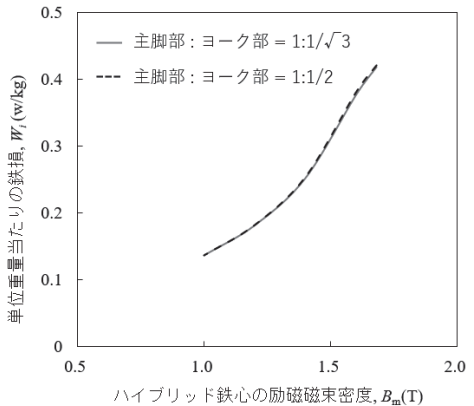


図 8 三相五脚ハイブリッド鉄心の珪素鋼板積鉄心のヨーク断面積の違いに対する鉄損

#### 4. 30 MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の開発

本章では、提案した三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の構造をもとに開発した 30 MVA 器について述べた<sup>4)5)</sup>。まず、電磁界解析により、30 MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の磁束密度分布と鉄損密度分布を算定するとともに、漏洩磁界によって支持構造で生じる渦電流損失を解析した。その結果、ハイブリッド鉄心内の磁束は、単相器と同様に励磁磁束密度に応じて、アモルファス鉄心と珪素鋼板積鉄心に適切に分担されることが明らかとなった。また、漏洩磁界による渦電流損失は同容量の方向性珪素鋼板変圧器と同等であり問題ないことが明らかとなった。

次いで、30 MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器を試作し、実用機器での検証を行った。アモルファス鉄心は剛性が低く自立困難である課題を解決するため、単相器の試作で採用した構造と同様に珪素鋼板鉄心をアモルファス鉄心の両側に配置し、アモルファス鉄心の支持部材の一部とすることで、自立可能な構造とした。また、円筒状巻線内の空間利用率を増加させるため、単相での試作器と同様に、幅の異なるアモルファス鉄心と珪素鋼板積鉄心を用いて、鉄心断面が円形に近い形となるように構成した。なお、変圧器のアモルファス鉄心と珪素鋼板積鉄心の実効断面積比率は、84:16とした。図9に、試作した 30 MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の完成姿を示す。図10に、ハイブリッド鉄心変圧器の磁気特性を評価した結果を示す。同図より、珪素鋼板積鉄心のみの変圧器に対して鉄損を約 62%低減可能であることが明らかとなった。また、設計磁束密度は 1.54 T であり、アモルファス鉄心のみの変圧器よりも約 10%高磁束密度化が可能であり、約 8%の小形化

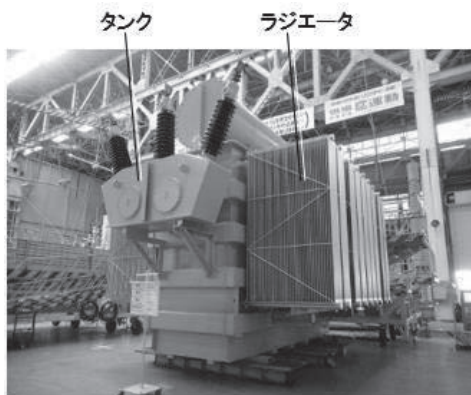


図9 30MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の外観

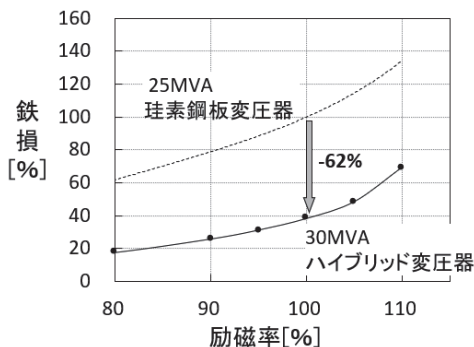


図10 30MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の鉄損評価結果

が見込めることも明らかとなった。

#### 5. まとめ

本論文では、送配電ロスの発生源の一つである変圧器の高効率化に着目し、低損失なアモルファス変圧器の大容量化について論じた。30 MVA 三相五脚ハイブリッド鉄心変圧器の試作により変圧器の成立性を示し、ラップ接合したアモルファス鉄心を用いた大容量ハイブリッド鉄心変圧器の効率とその効果を検証し、負荷率 40%におけるハイブリッド鉄心変圧器の効率は 99.7%と、従来製品に対して 0.2%高効率化可能であることがわかった。具体的には、例えば、2 MVA~100 MVA の変圧器が今回開発したハイブリッド鉄心変圧器に置き換わった場合には、国内で年間約 22 万トンの CO<sub>2</sub> 削減効果が見込まれる。また、アモルファス変圧器の世界普及率は 14%と低いため、これを増加させることで、より多くの効果が見込める。

#### 文献

- 1) 日立金属株式会社：「アモルファス合金薄帯」, カタログ No. HJ-B10-B (2014).
- 2) 栗田直幸, 西水 亮, 師岡寿至, 小林千絵, 宮本直哉, 浜館良夫, 石上 孝, 山田 悠, 佐々木康二, 佐竹誉大, 福山哲也, 電気学会論文誌 B, **138** (2018) 53.
- 3) 小林千絵, 栗田直幸, 小木瑞, 西水亮, 山岸明, 日本磁気学会論文特集号, **5** (2021) 32.
- 4) 小林千絵, 栗田直幸, 西水亮, 山岸明, 大原伸也, 小木瑞, 高橋晃一, 田中雄一郎, 桑原正尚, 電気学会論文誌 B, **140** (2020) 323.
- 5) C. Kobayashi, K. Naoyuki, M. Ogi, A. Nishimizu, S. Ohara, K. Masanao, CIRED 2021 Conference, paper 0115, Geneva, 2021.