

アモルファス変圧器 《第四報》

Amorphous Metal Core Transformer

矢後 克二

Katsuji Yago

長江 洋典

Hirofumi Nagae

Commercial production of amorphous metal core transformers has been commenced, with the products being under field tests in actual distribution lines to study their practical performance. In order to verify the independent performance of amorphous metal cores concurrently with the above tests, the authors tested amorphous toroidal cores for their degradation under heat. They also measured the core loss, hysteresis curve and temperature rise of the amorphous metal core used in transformer, and compared them against those of a silicon steel core.

Results of the aging test proved that the amorphous metal core cleared the requirement for long term reliability of distribution transformer.

Loss measurement showed that core loss of an amorphous metal core is less than one third of a silicon steel core. The authors attempted to prove that the low core loss was due to the greatly reduced eddy current loss as well as to less hysteresis loss, through separation of core loss and study of the hysteresis curve.

Temperature distribution over the core surface was also measured by thermograph; because an overlapping portion showed higher temperature than other portions, it was proved that penetration of the magnetic flux into adjacent core sheets in the direction of thickness increased the core loss.

1 まえがき

アモルファス磁性材料は、静止器や回転機などの電気機器用鉄心材料として広く使用されているけい素鋼磁性材料に比べて、その鉄損値が大幅に小さいことから、実器への応用研究が盛んに行われてきた。特に、変圧器の鉄心にアモルファス磁性材料を使用した場合は、無負荷損を従来品の $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{2}$ に低減でき、大きな省エネルギー効果が得られる。

当社では、1981年にアモルファス変圧器の実用化に向けての研究を開始して以来、今日まで、素材及びモデル鉄心による基礎特性調査、並びに単相柱上変圧器の試作及び3相積鉄心変圧器の試作を通じて数々のノウハウの蓄積を図った。その成果については既刊の技報において報告済みである。

現在、商業生産によるアモルファス変圧器のフィールドにおける性能評価試験が実施されているが、今回、こ

れと並行してトロイダルコアによる熱劣化特性の検証及び鉄心単体でのけい素鋼鉄心との特性比較を行ったので報告する。

2 熱劣化特性検証

2.1 長期劣化試験

アライド・シグナル社製のMETGLAS 2605S-2を用いて作製したトロイダルコアを試料として、加熱温度100℃で7年間の劣化試験を行った。試料の寸法は、内径55×幅50.8×巻厚9mmとし、所定の寸法に巻いた後、不活性ガス中で800A/mの磁界を加えながら400℃2時間の熱処理を施した。試験の条件を①100℃油中1.3テスラにて連続励磁、②100℃油中無励磁、③100℃気中無励磁、とし、1箇月毎に加熱を中断して室温(30℃)まで炉冷後、特性を測定した。初期値からの変化率を図1及び図2に示す。

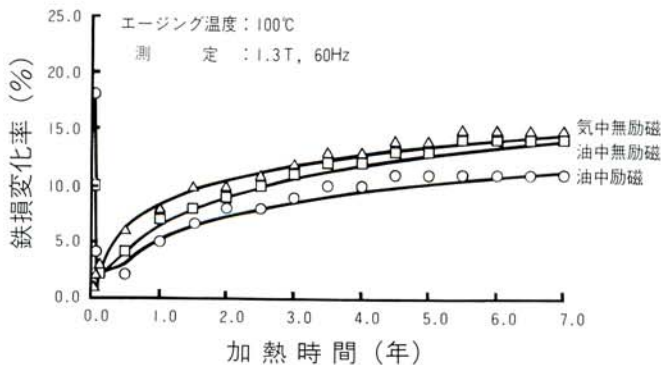


図1/鉄損の変化

Fig.1/Change of core loss during 100°C aging test

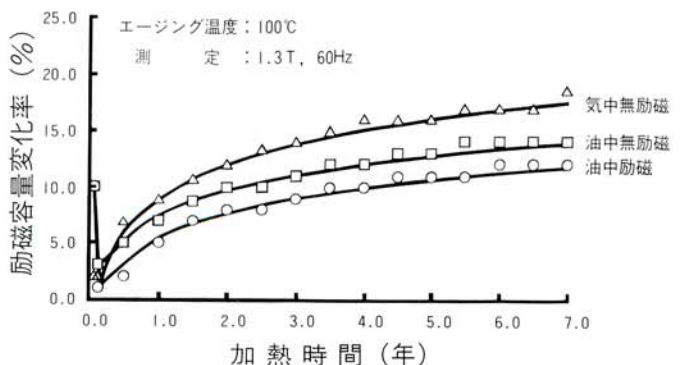


図2/励磁容量の変化

Fig.2/Change of exciting power during 100°C aging test

※変圧器事業部 技術部

油中に浸漬した試料は、試験の初期に、トロイダルコアの巻層間に残留している気泡の応力作用と考えられる不安定な挙動を示しており、変化値は、一度上昇した後には下降するが、初期値（浸漬前の気中での測定値）までは回復しない。その後は加熱時間の経過と共に上昇するが、再上昇が始まってからおよそ2年後あたりから飽和の傾向が見られ、以後の変化は僅少である。劣化の原因は、加熱と共に絶縁油中の硫黄、炭素、水分などによる酸化物が試料表面に発生し、これが磁性体の磁区構造を変化させたためと考えられる。また、気中での加熱試料の劣化は、上述同様酸化（発錆）によるものであり、特性の変化率が最も大きい。

油中常時励磁の試料は、無励磁の試料より劣化の程度が小さい。これは、常時励磁により鉄心中を流れる磁束の方向と一致した180度磁区が常に保たれ、表面酸化物の応力による磁区の乱れを抑制しているためと推定できる。この試料は、運転中の変圧器鉄心を模擬しており、特性の初期値を先に述べた一度上昇してから次に下った点とすれば、7年経過後の鉄心特性の変化率は10%以下である。また、試料の大きさが実際の変圧器鉄心の大きさに比べて非常に小さいために、試料に与える油の影響が過大であること及び通常の定格連続運転時における変

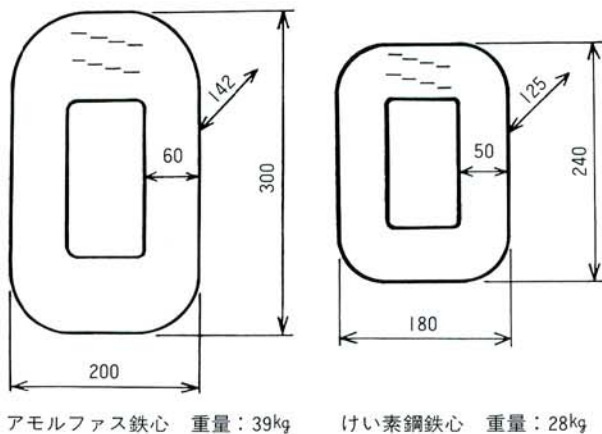


図3/供試鉄心

Fig.3/Core dimension

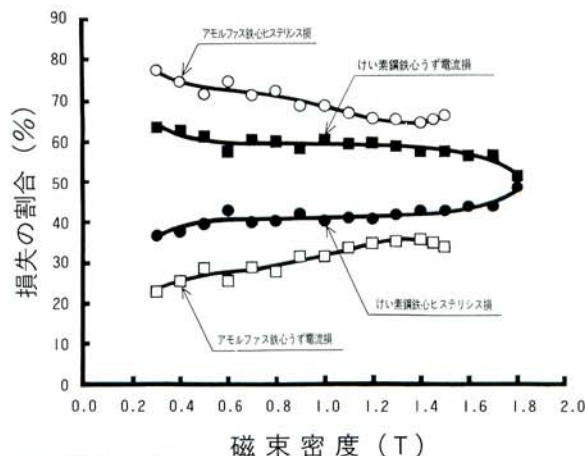


図5/鉄損分離

Fig.5/Separation of core loss

圧器油温度は平均75～80℃であることを考慮すれば、この程度の劣化は実用上問題ないものと考えられる。

3 けい素鋼鉄心との特性比較

3.1 供試鉄心

アモルファス変圧器の完成品としての性能評価は、すでに数多く実施されているが、ここでは鉄心単体の特性について改めてけい素鋼鉄心との比較を行った。図3に試料とした鉄心の外観寸法を示す。どちらも10kVA相当品である。素材は、アモルファス鉄心はアライド・シグナル社製のMETGLAS 2605S-2（0.025mm厚）、けい素鋼鉄心は、高配向性27P100（0.27mm厚）で、いずれもダブルステップラップ接合を持つ1ターンカット巻鉄心である。

3.2 鉄損及びヒステリシスループ

図4に測定した鉄損特性曲線を示す。飽和磁束密度がおよそ2.0テスラである高配向性けい素鋼帯を使用した鉄心の常用磁束密度は一般に1.6～1.75テスラであるが、この時の鉄損値は約31～43Wとなる。一方、アモルファ

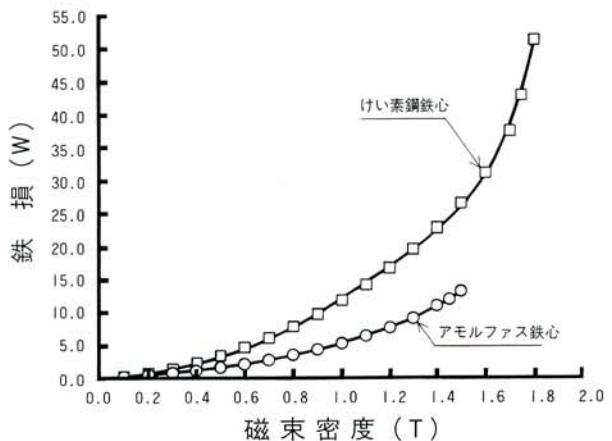


図4/鉄損特性

Fig.4/Core loss characteristics

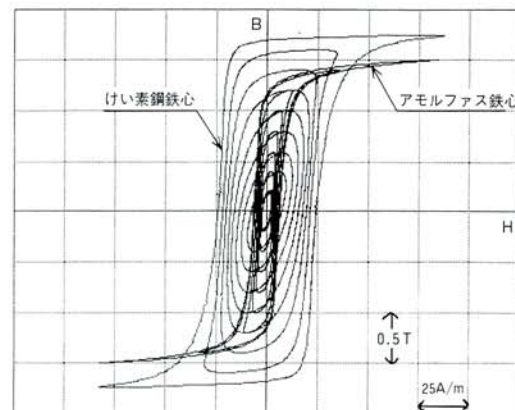


図6/交流ヒステリシスループ

Fig.6/AC Hysteresis loop

ス鉄心は、飽和磁束密度が約 1.6 テスラであるため、常用磁束密度は 1.3 ~ 1.35 テスラであり、この時の鉄損値は約 9 ~ 10W で、けい素鋼鉄心の $\frac{1}{3}$ 以下である。磁束密度を 1.3 テスラに合せた時の両鉄心の鉄損値は、けい素鋼鉄心が 19.7W に対しアモルファス鉄心は 9.2W であり $\frac{1}{2}$ 以下となっている。

磁束密度をそれぞれ 1.3 テスラ及び 1.6 テスラとした時の鉄損及び励磁電流を表 1 に示す。

鉄損をヒステリシス損とウズ電流損に分離すると図 5 のようになり、アモルファス鉄心は、ヒステリシス損とウズ電流損の比が約 7 対 3、けい素鋼鉄心では約 4 対 6 の割合となっている。アモルファス鉄心は、素材の厚みが非常に薄いこと及び固有抵抗が高いためウズ電流損が極めて小さいことが大きな特徴である。

交流 60Hz で励磁した時のヒステリシスループを図 6 に示す。同図は、磁界の強さ [H] を 0 から 80A/m まで増加させた時のループの変化も示している。図 6 よりアモルファス鉄心は、磁束密度 [B] は低い、保磁力が小さいためにループの面積 (=鉄損) がけい素鋼鉄心に比べて小さく、また、ウズ電流損が小さいため、磁束密度を高くしてもループが太らない。各小ループの頂点を連続的につないだ曲線は、一般的な交流磁化曲線を表すが、この B-H 曲線の勾配を比較すればアモルファス鉄心の透磁率が高いことが分かる。これは、アモルファス鉄心の方が磁化され易いことを示しており、表 1 のとおり励磁電流も小さくなっている。

表 1 / 鉄損及び励磁電流

Tab.1/Core loss and Exciting current

	アモルファス鉄心	けい素鋼鉄心
1.3テスラ時 鉄損	9.2W	19.7W
励磁電流	0.17%	0.27%
1.6テスラ時 鉄損	—	31.0W
励磁電流	—	0.36%

3.3 鉄心温度上昇

熱となって消費される鉄心中の損失を視覚的に捉えることは興味ある方法である。そこで、赤外線放射温度計を用いて、気中における鉄心の表面温度分布を測定した。同時に、放射温度計の性能を確認するため、鉄心のラップ接合部とその反対側ヨーク（一般積層部）の温度を熱電対により測定した。測定結果を図 7 に、また、温度分布測定例を図 8 に示す。

図 7 は、けい素鋼鉄心の磁束密度が 1.3 テスラ及び 1.6 テスラ、アモルファス鉄心が 1.3 テスラの場合を示しており、それぞれ、実線は熱電対記録温度計による温度上昇値、プロットは赤外線放射温度計により測定した温度上昇値である。なお、図中の記号 A はアモルファス鉄心、S はけい素鋼鉄心を示し、サフィックス l はラップ接合部を、n はラップ接合部と反対側の一般積層部を示している。

温度計の違いによる指示差はほとんどなく、良い一致を見ており、赤外線放射温度計の有用性が認められた。

けい素鋼鉄心では、磁束密度が 1.6 テスラの場合、初期からラップ接合部と一般積層部とで温度差が見られるが、低磁束密度の 1.3 テスラ時には温度差は生ぜず、また、アモルファス鉄心では温度差は見られるがその差は小さい。

ラップ接合部においては磁束が素材の厚み方向へと渡るが、この時の磁束密度の大小（飽和現象の有無）及び発生するウズ電流損の大小が温度上昇に影響するものであり、磁束密度が低い場合や薄帯でかつ固有抵抗の高いアモルファス鉄心ではその値が小さい。

温度上昇の飽和値を比較すると、けい素鋼鉄心を 1.6 テスラ、アモルファス鉄心を 1.3 テスラで励磁した場合は、それぞれ 21K 及び 6.5 K となり、その比 (3.2) は無負荷損の比 (31W : 9 W = 3.4) とほぼ同一である。また、けい素鋼鉄心を 1.3 テスラで励磁した場合の比較では、13K : 6.5K = 2.0 となり、無負荷損比 20W : 9 W = 2.2 とほぼ

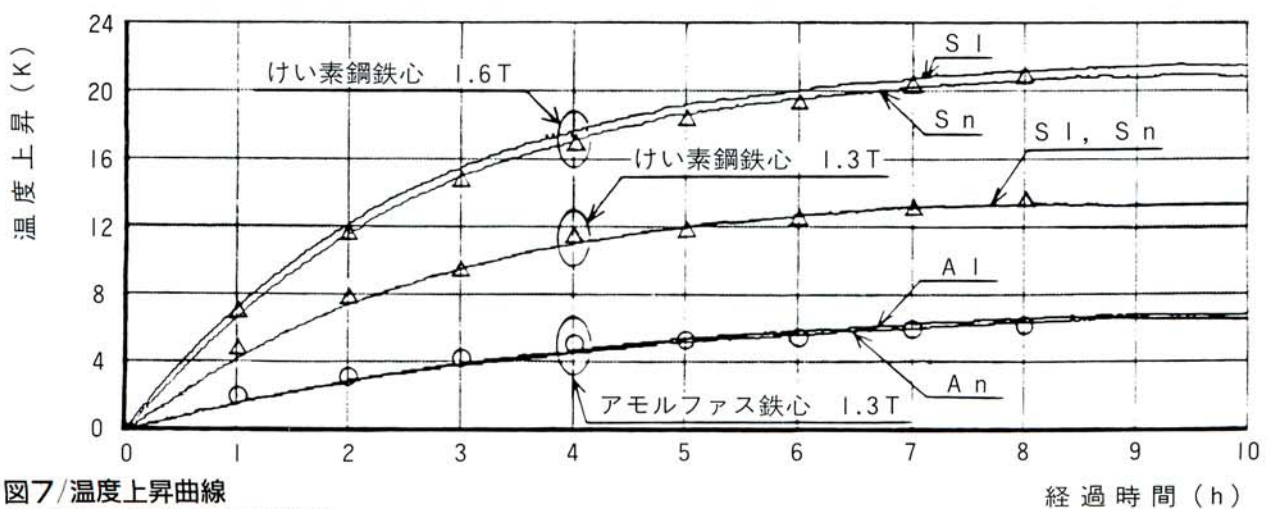


図 7 / 温度上昇曲線

Fig.7/ Temperature rise of core surface

同じであることが分る。温度上昇曲線から求められる時定数を比較すると、けい素鋼鉄心が約 2.3 時間であるのに対し、アモルファス鉄心は約 3.5 時間と長い。

図 8 は、アモルファス鉄心を、1.3 テスラ、けい素鋼鉄

心を 1.6 テスラで励磁した時の時間の経過と鉄心表面の温度分布変化をサーモグラフで表しており、けい素鋼鉄心の方が早目に帯色すること及びラップ接合部と一般積層部とで差があることが明らかとなっている。

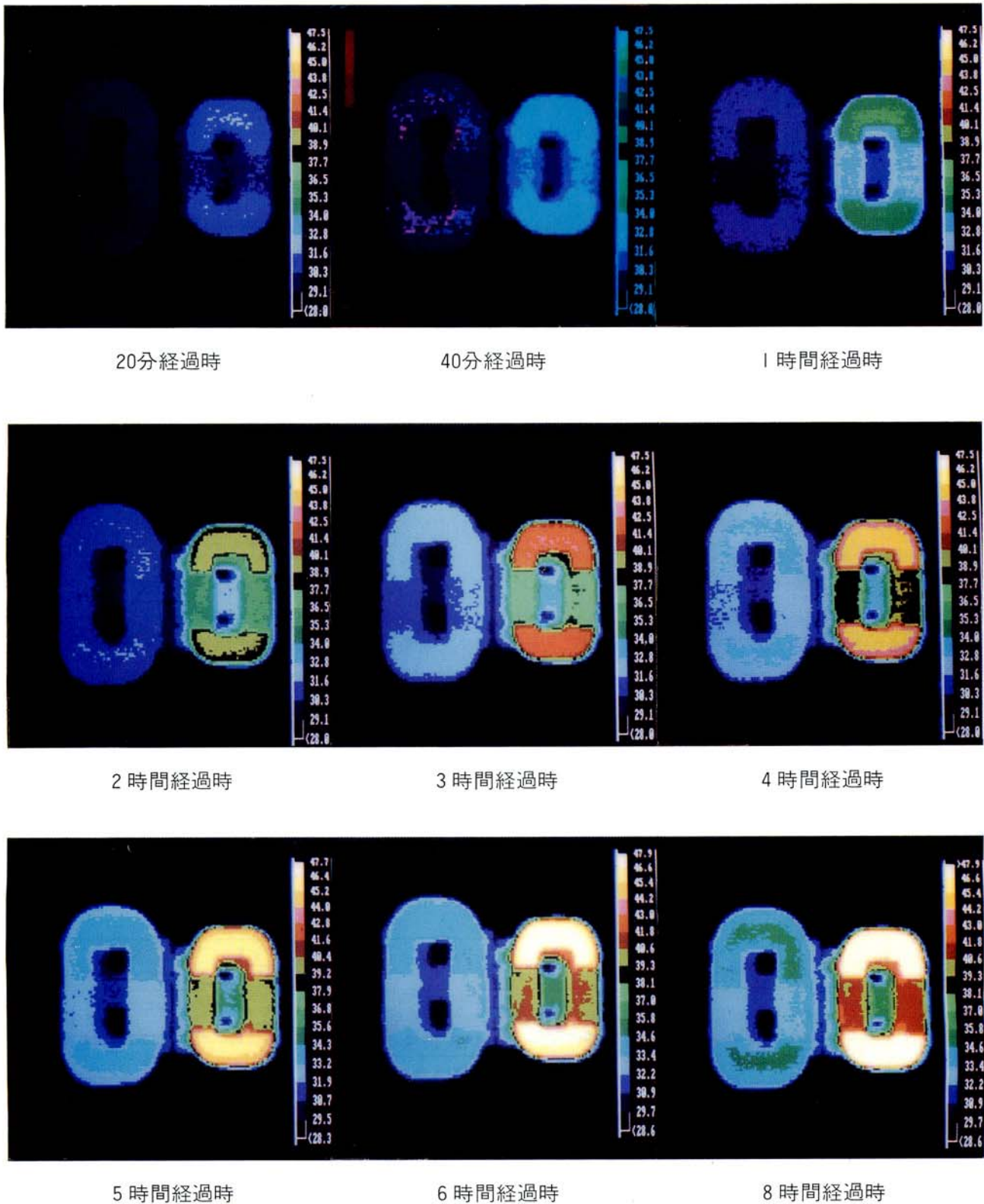


図8/温度分布

Fig.8/ Temperature distribution of core surface

4 まとめ

長期熱劣化試験によりアモルファス鉄心の熱安定性を検証した結果、実用上における熱的問題はないと判断される。しかし、油中の試料は、試験初期に不安定な挙動を示し、アモルファス磁性材料特有のセンシティブな面を表している。

ヒステリシスカープから明らかのように、けい素鋼に比べアモルファスは非常に磁化され易いすぐれた軟磁性材料であり、透磁率が高く鉄損が小さい。ただし、飽和磁束密度が低いために、常用磁束密度を現行のけい素鋼鉄心より低くせざるを得なく、その結果、実用面での鉄心が大きくなる。

鉄損分離によれば、透磁率が高いアモルファス鉄心はヒステリシス損も小さいが、特にうず電流損が小さくなるのが特長である。これは、素材の板厚がけい素鋼の約 $\frac{1}{6}$ であること及び固有抵抗が高いことに起因している。固有抵抗が高いことから、現在使用しているアモルファス磁性材料は、けい素鋼のような表面絶縁被膜を有していないが、今後、より広い幅の材料を使用する場合は、層間絶縁が新しい問題となるかも知れない。

鉄心の温度上昇試験では、アモルファス鉄心の方が温度時定数が長い。これは当然のことながら、発生損失が少ないこと、鉄心の熱容量が大きいことによっている。現行けい素鋼鉄心に比べて、アモルファス鉄心が大きくなることは既に述べたが、鉄心が大きくなるに伴い、必然的にコイル、タンクなどの質量も増加する。これらは、一般にマイナス面として評価されているが、変圧器を過負荷運転する場合には、鉄心、コイル、油及びタンクの熱容量(=比熱×質量)が大きくなるので、油温上昇の時定数が長くなり、短時間過負荷耐量の面で有利になる可能性がある。

鉄心の表面温度をサーモグラフにより測定した結果は、熱電対による測定と良く一致しており、また、鉄損値と一定の相関関係にあることが分かった。鉄心の局部的損失の測定に、このサーモグラフ法が応用できるか、今後研究したい。

5 あとがき

1990年の日米交渉の結果、わが国では1991年から向こう2年間で32,000台のアモルファス変圧器を製作し、フィールド試験を行うことになった。それに合わせて当社は、1991年春にアモルファス変圧器専用工場を新設し、準量産体制を確立、同年初夏にはこの工場から製品第一号を出荷した。これらについての詳細報告は別の機会に譲るとして、本稿では、アモルファス変圧器の実用化にあたって、アモルファス鉄心の基本的な特性の再確認を行った。

夢の材料と言われ、大きな省エネ効果を期待されている電力用アモルファス軟磁性材料もようやく変圧器鉄心に採用されて世に出ることができた。しかし、総合的な見地からけい素鋼鉄心変圧器と比較した場合、今後もお一層の研究・努力が必要とされている。

参考文献

- (1) 柳沢ほか：アモルファス変圧器《第一報》。
愛知電機技報 No.2, P21 - 29 (1986)
- (2) 柳沢ほか：アモルファス変圧器《第二報》。
愛知電機技報 No.3, P22 - 27 (1986)
- (3) 宮田ほか：アモルファス積鉄心変圧器。
愛知電機技報 No.5, P10 - 14 (1987)
- (4) 矢後, 長江：小形変圧器におけるアモルファス鉄心とけい素鋼鉄心の特性比較。
電気学会研究会資料 MAG-92-39, マグネティックス研究会編, 電気学会, 1992