ギャップ付きアモルファスカットコアの鉄損低減

Reduction in Core Loss in Amorphous Cut Cores with Air Gaps

福永博俊・江口 徹・三田登茂子・太田幸彦*・掛橋英典*

長崎大工学部, 長崎市文教町 1-14 (〒852)

*松下電工(株), 門真市門真 1048 (〒571)

H. Fukunaga, T. Eguchi, T. Mita, Y. Ohta* and H. Kakehisi*

Faculty of Engng., Nagasaki Univ., 1-14, Bunkyo-machi, Nagasaki 852

*Matsushita Electric Works, Ltd., Kadoma 571

In order to reduce core loss in amorphous cut cores with air gaps, the effects of ferrite plates attached to cut surfaces of the cores were investigated. It was earned that the attachment of thin ferrite plates decreases core loss remarkably in amorphous cut cores with air gaps. It has also been discovered that this method of reducing core loss is effective in induction levels up to 0.7 T. Computer simulation of leakage flux in an amorphous cut core with air gaps suggests that this reduction is attributable to decrease of the leakage flux perpendicular to amorphous ribbon surfaces due to the attachment of the ferrite plates.

1. 序 文

非晶質磁性薄帯は優れたコア用材料として注目されているが、加工性に乏しいため、トロイダル形状で 사용되는場合が多い。しかしながら、コア形状をトロイダルに限定するとコアの用途が限られるため、より広い用途での応用をめざして、最近では積層コア¹⁾やカットコア^{2)~7)}など多様な形での特性が検討されている。

カットコアはエアギャップを設けずに使用する場合と設けて使用する場合とがある。エアギャップを設けない非晶質カットコアはトロイダルコアに近い特性を示すことが報告されており^{2)~5)}、既に市販品も出回っている。一方、透磁率の制御や直流重畳の対策として磁路の一部にエアギャップを設けたコアが電子機器の電源部等に使用されている。エアギャップを有する非晶質カットコアに関しては、直流重畳時の透磁率特性を重視した出力チョークコイルなどへの応用例が報告されているが^{6), 7)}、高周波・大振幅磁束での鉄損に関する系統的報告はなされておらず、その詳細は知られていない。最近筆者らは磁路の一部にエアギャップを設けたギャップ付き非晶質カットコアの高周波・大振幅磁束での特性を調べ、エアギャップを設けると著しい鉄損増加が起こることを示し

Fig. 1 Schematic representation of in-plane eddy current and leakage flux in amorphous cut core with air gaps.

た。またこの原因が、Fig. 1 に模式的に示すような非晶質薄帯面に垂直な漏れ磁束による面内渦電流損失と考えられることを報告した⁸⁾。

本論文ではギャップ付き非晶質カットコアのカット面にフェライト板を貼り付け、面内渦電流を抑制して鉄損を低減する新しい方法について報告する。

2. 鉄損低減法および実験法

本論文で用いた鉄損低減法を Fig. 2 に示す。これはギャップ付き非晶質カットコアのカット面にフェライト板を貼りつける方法である。フェライト板は非晶質部分での垂直漏れ磁束を抑制する働きをしているが、詳細は議論の節で述べる。なお、本研究ではコア外側に設けた固定枠によってフェライト板を力学的に固定し、その断面積をコアの断面積と同程度とした。また、フェライトとしては日本フェライト(株)製 SB-7C (飽和磁束密度 0.5 T) を用いた。

フェライト板の効果を調べるために非晶質カットコアを作製して鉄損の測定を行った。測定に用いたカットコアは零磁歪のコバルト系非晶質薄帯 (飽和磁束密度 0.9

Fig. 2 Method of reducing core loss in amorphous cut cores with air gaps. Ferrite plates are attached to cut surfaces of a core.

T)をトロイダル状に巻き、熱処理、エポキシ系樹脂³⁾含浸後、回転砥石によりカットし、端面を鏡面に磨いて作製したものである。コアの磁路長は8cm、断面積は0.4cm²程度とした。非晶質薄帯の占積率は約70%である。

一般にエアギャップを有するコアでは力率が悪く、一次巻線電流と二次巻線誘起電圧を掛け算して鉄損を測定する方法では正確な測定が困難となる。そこで本研究では、一次側に力率改善用コンデンサを挿入し、励磁電流と励磁電圧を掛け算することにより、銅損、誘電体損を含めた形で損失を測定した。鉄損 W_f は測定した全損失 W_t から励磁巻線および力率改善用コンデンサでの損失を差し引くことにより

$$W_f = W_t - I_{rms}^2(R_m + R_c) \quad (1)$$

と算定した。ここで、 I_{rms} は励磁電流実効値、 R_m 、 R_c はそれぞれ励磁巻線抵抗、コンデンサ等価直列抵抗である。近接効果および表皮効果を抑制するために励磁巻線にはリッツ線を用い、 R_m は鉄損測定と同じ周波数で測定した。また、 R_c はLCRメータ(YHP4275A)により決定した。なお、本論文の測定範囲では(1)式右辺第2項は W_t の41%以内であった。

3. 実験結果

Fig. 3にはギャップ長 ΔG を調整して比透磁率 μ_r を変化させた際の非晶質カットコアの鉄損をフェライト板のある場合とない場合について示す。測定周波数は40kHz、磁束密度 B_m は0.2Tである。図の横軸は $1/\mu_r$ にとってあるが、 $1/\mu_r$ はほぼ ΔG に比例するため、 $1/\mu_r$ の増加はギャップ長の増加に対応している。フェライト板のない際には $1/\mu_r$ の増加(ΔG の増加)とともに鉄損は著しく増加するが、フェライト板を貼り付けた場合にはあまり増加しない。また、フェライト板が厚くなるに従って ΔG 増加による鉄損増加が抑えられている。ギャップなしの鉄損と $1/\mu_r = 10.0 \times 10^{-3}$ の点での鉄損

Fig. 3 Iron loss per cycle at 40 kHz in amorphous cut cores as a function of inverse of relative permeability μ_r . Inverse of μ_r is nearly proportional to gap length.

を比較すると、その比はフェライト板がない場合には4.6倍程度となるのに対し、フェライト板の厚さを1mmとした場合には、1.9倍、4mmとした場合には1.4倍程度にしかならない。フェライト板を貼り付けたコアでは ΔG の小さい際にわずかに鉄損が増加するが、 ΔG の大きいところではフェライト板による鉄損低減効果がこれをはるかに上回る。以上のことより、大きなエアギャップを設けた非晶質コアではカット面にフェライト板を貼り付けることにより顕著に鉄損を低減できることが理解できる。なお、フェライト板を貼り付けたコアで ΔG の小さい際に鉄損増加が観測されるのは、カット面が完全には平面でないため非晶質磁心とフェライトの接合部で磁束の集中が生じるためであると考えられる。

Fig. 4には貼り付けるフェライト板の厚さの効果を示す。ここに示す測定範囲内では、フェライト板の厚さと鉄損の関係はほぼ反比例しており、フェライト板の厚さ4mmで鉄損低減の効果はほぼ飽和している。

フェライトは非晶質合金に比べ飽和磁束密度が0.5Tと低いため、コア部の磁束密度 B_m を高くした場合フェライト板飽和の影響が問題となる。そこで、フェライト板を貼り付けたコアの鉄損を B_m を変化させて測定した結果をFig. 5に示す。測定は $B_m = 0.2$ Tの際の透磁率が約200および350となるようにギャップ長を調整した後、ギャップ長を変化させずに行った。図にみられるように、フェライト板の鉄損低減効果は高磁束密度部でも大きく、フェライトの飽和磁束密度を越える $B_m = 0.7$ Tでも効果が認められた。この原因は以下のように考えられる。すなわち、フェライト板の占積率が非晶質コアに

Fig. 4 Effect of thickness of ferrite plates on iron loss per cycle in amorphous cut core with air gaps.

Fig. 5 Effect of maximum induction level B_m on iron loss per cycle in amorphous cut core with airgaps. The permeabilities at $B_m = 0.2$ T are controlled at about 200 and 350.

比較して大きいことやフェライト部で大きな漏れ磁束があることのため、フェライト部での磁束密度は非晶質コア部分でのそれより低くなっている。したがって、非晶質部を 0.7 T まで励磁してもフェライト板のすべての領域では磁束飽和が起こっておらず鉄損低減効果が現れると考えられる。

4. 議 論

序文で述べたように、エアギャップによる鉄損増加の原因は垂直漏れ磁束にあると考えられる。したがって、フェライト板による鉄損低減は垂直漏れ磁束の減少によって予測される。これを確認するために、漏れ磁束を二次元の有限要素法により検討した。解析に際しては、計算機の記憶容量の制限から半円状の非晶質カットコアを Fig. 6 に示すような棒状の非晶質コアが無限に続くモデルとして近似し、解析条件は

- (1) 非晶質薄帯の積層 (99 枚) を考慮し、その占積率は 70% とする
- (2) エアギャップの大きさは 0.8 mm とする
- (3) 非晶質部およびフェライト部の比透磁率をそれぞれ 25,000, 5000 とする
- (4) 渦電流は考慮しない

とした。また、薄帯内分割のため要素が偏平となるため、倍精度変数を用いるとともに行列の取扱いには十分注意を払った。

Fig. 7 に解析の結果を、Fig. 6 に網掛けで示した部分について示す。結果は図を見やすくするために横方向に拡大されている。Fig. 7(A) に見られるように、フェライト板がない場合には、非晶質コア内部で薄帯面に垂直な方向の磁束が広い範囲で発生している。これに対し、

Fig. 6 Analyzed model. Semi-circular cores are replaced with bar-like cores arranged infinitely. The results for the dotted region are shown in Fig. 7.

Fig. 7 Flux distributions in amorphous cut cores with air gaps. The figures show the results for the dotted region in Fig. 6. Ferrite plates are attached to cut surfaces of the cores shown in (B), (C) and (D).

Fig. 7(B)-(D) に示されるように、フェライト板を貼り付けた場合にはコア内部での磁束の広がりや抑えられ、垂直漏れ磁束はフェライト部で発生している。フェライト部は抵抗率が高いので、この部分では渦電流はほとんど発生しないと考えられる。

面内渦電流による損失は非晶質薄帯部での垂直漏れ磁束密度の二乗平均に比例すると考えられる。Fig. 7 の結果では、4 mm のフェライト板を貼り付けるとフェライト板のない場合に比べて、この値は 1/70 に低減される。本研究の解析では渦電流を考慮していないので、実際の垂直漏れ磁束はこれより少なくなると予測されるが、定性的には Fig. 7 の結果は有効であろう。したがって、これらの結果よりフェライト板により非晶質薄帯部での垂直漏れ磁束が著しく抑制され、抵抗率の高いフェ

ライト部で磁束の漏れが発生するようになったことが鉄損低減の原因であると考えられる。

5. 結 論

本研究により明らかとなった諸点を要約すると

- (1) 非晶質カットコアのギャップ導入による鉄損増加は非晶質コアのカット面にフェライト板を貼り付けることにより抑制できる
- (2) この原因はフェライト板により非晶質コア部での垂直漏れ磁束が減少し、面内渦電流が抑制されるためと考えられる
- (3) フェライト板の鉄損低減効果は非晶質コア部の平均磁束密度が 0.7 T まで確認された。

となる。

非晶質カット面に貼り付けるフェライト板の形状やカット面の仕上げ精度なども鉄損に影響するが、詳細は今後検討を要する。

本研究を進めるにあたり、実験にご協力下さった長崎大学生古賀浩二氏に、また終始励ましをいただいた長崎大学藤山寛教授に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 例えば、池田、大村、漆原、岡田：電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-84-51 (1984).
- 2) 乾、黒沢、鈴木、坂本：同上、MAG-82-106 (1982).
- 3) 太田、掛橋：同上、MAG-84-134 (1984).
- 4) H. R. Hilzinger: Proc. of 5th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, 1695 (1984, Würzburg).
- 5) H. R. Hilzinger: *IEEE Trans. Magn.* **MAG-21**, 2020 (1985).
- 6) 重田、柴田、菅谷：日本応用磁気学会研究会、45-2 (1986).
- 7) 沢、広瀬、猪俣：東芝レビュー、**39**, 735 (1984).
- 8) 福永、江口、太田、掛橋：電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-87-64 (1987).

1988 年 11 月 21 日受理、1989 年 2 月 10 日採録