

打ち抜きアモルファス合金を用いた スイッチトリラクタンスモータの実機評価

学生員 桜井 宏崇 学生員 熊谷 崇宏 学生員 徳井 幸輝

上級会員 伊東 淳一 正員 日下 佳祐 (長岡技術科学大学)

非会員 山口 貴史 (株式会社山口製作所) 非会員 中川 昌幸 (新潟県工業技術総合研究所)

正員 佐藤 大介 (長岡モーターディベロップメント株式会社)

Experimental Evaluation of Switched Reluctance Motor Made by Blanking Amorphous Alloy Foil

Hiroataka Sakurai, Student Member, Takahiro Kumagai, Student Member, Koki Tokui, Student Member, Jun-ichi Itoh, Senior Member, Keisuke Kusaka, Member (Nagaoka University of Technology), Takashi Yamaguchi, Member (Yamaguchi Manufacturing Co., Ltd.), Masayuki Nakagawa, Member (Industrial Research Institute of Niigata Prefecture), Daisuke Sato, Member (Nagaoka Motor Development Co., Ltd.)

This paper compares characteristics of switched reluctance motors (SRMs) made by blanking (a) 20HX1300 of high-grade low-iron-loss silicon steel and (b) 2605SA1 of amorphous alloy. The blanking of the amorphous alloy is an innovative technology for the mass production of the high efficiency amorphous-alloy-motor. As first prototype, 70W-SRM (40mm thickness) is manufactured by blanking 1600 sheets of the amorphous alloy and adhesively laminating them. In experiment, the motor efficiency of the amorphous-alloy-SRM is improved by 8.9p.p.t. compared with that of the silicon-steel-SRM. In addition, the iron loss of the amorphous-alloy-SRM is reduced by 80.2% compared with that of the silicon-steel-SRM.

キーワード : スイッチトリラクタンスモータ, リングコア, 有限要素解析, アモルファス合金, 打ち抜き, 鉄損

Keywords : Switched reluctance motor(SRM), ring core, finite element analysis(FEA), amorphous alloy foil, blanking, iron loss

1. はじめに

近年、モータのさらなる小型化、高出力密度化のため、モータの高速化が進んでいる。とりわけ、高速回転時の効率向上を目的として、低鉄損な材料であるアモルファス合金の適用が検討されている。アモルファス合金は、薄く、電気抵抗率も高いため、渦電流損が小さく、また、結晶構造を持たないため、ヒステリシス損が小さいという特徴を有する。これまで、アモルファス合金を適用したモータを試作し、高い効率を達成した事例が数多く報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、アモルファス合金は薄く、硬く、脆いという特徴から、これらの事例のモータコアの加工には、ワイヤー加工やエッチングに頼っており、低コストで量産することは難しい。

電磁鋼板を使ったモータを量産するには、モータコアを電磁鋼板から打ち抜きによって製作するのが一般的である。一方で、打ち抜き時に電磁鋼板内で発生する歪みや残留応力によって、磁化特性が劣化することが知られており、これら

がモータ性能に与える影響を定量的に把握することが重要である。アモルファス合金を適用したモータの量産化が期待される中で、アモルファス合金の打ち抜き加工技術の確立と、打ち抜き加工による劣化の定量的な評価が望まれる。

打ち抜いたアモルファス合金を適用したモータの試作と評価の事例として、分割コアを用いた事例⁽³⁾が報告されている。しかし、組み立て精度や接合部に起因する特性劣化の問題から、分割コア方式は量産時の製作方法の主流ではなく、通常のモータの特性に近いかは不明である。加えて、鉄損の解析には、スタインメッツ式から計算した鉄損値に、ビルディングファクター(BF)係数を乗じて行うが、BF係数は通常の電磁鋼板で得られた知見を元にしており、アモルファスで正確に鉄損を解析できているとは言えない。

本論文では、実際の量産時の製作に近い方法であるモータ形状一体打ち抜きによるモータの試作と評価を目的として、鉄損と効率特性を解析と実験により評価する。その際、ワイヤーカットと打ち抜きで製作したリングコアを用いた事

前評価により、打抜いたアモルファス合金に適したモータを把握し、適した条件下でモータの実験を行う。また、BF係数に頼らない解析を用いることで、打抜いたアモルファス合金の鉄損特性の正確な把握を行う。

2. リングコアを用いた磁気特性の事前評価

〈2・1〉 **リングコアの仕様** 表1に実験に使用するリングコアの仕様を示す。本論文では、コアの鉄損特性を評価するために、2種類の材料と2種類の加工方法により、4つのリングコア(『SS-C』『SS-B』『AA-C』『AA-B』)を製作した。『SS-C』と『AA-C』は、高品質低鉄損ケイ素鋼板 20HX1300とアモルファス合金 2605SA1を積層した後に、ワイヤー加工により製作したリングコアである。一方、『SS-B』と『AA-B』は、20HX1300と2605SA1を打抜き加工した後に、接着積層して製作したリングコアである。なお、ワイヤー加工したリングコアは、層間短絡による渦電流損の増加を抑制するために切断面にエッチング処置を施している。

〈2・2〉 **鉄損特性の実験結果** 表2に二周波法⁽⁴⁾を用いて導出した各リングコアのスタインメッツ係数を示す。スタインメッツの方程式は次式で与えられる。

$$W_i = K_{hys} f B_m^{\alpha_{hys}} + K_{eddy} f^2 B_m^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α_{hys} , K_{hys} , K_{eddy} はヒステリシス損失と渦電流損失の係数である。なお、表皮効果を含まない渦電流損失を評価するために、印加する正弦波電圧の周波数を 50Hz~500Hzの低周波数とした。表2より、アモルファスの渦電流損係数 K_{eddy} は、ケイ素鋼板に比べて90%程度低く、渦電流損は1/10程度の低減が予想できる。一方、アモルファスのヒステリシス損係数 K_{hys} は、ケイ素鋼板に比べて50%低く、ヒステリシス損は1/2程度低減の見込みとなる。また、加工方法による特性の違いに着目すると、SS-Bの K_{eddy} がSS-Cの K_{eddy} に比べて20.6%と増加するのに対し、AA-Bの K_{eddy} はAA-Cに比べて24.1%減少する。また、SS-BとAA-Bの K_{hys} は、SS-CとAA-Cに比べて、17.9%、23.0%とどちらも増加する結果の原因は、(i)SS-CおよびAA-Cのエッチング処理で除去しきれなかった切断面の導電性要素による層間短絡の影響と、(ii)SS-BおよびAA-Bの打抜き加工により発生した歪みや残留応力の影響が考えられる。つまり、渦電流損に対する残留応力の影響は、ケイ素鋼板では残留応力の方が大きく、アモルファス合金では残留応力の方が小さいと考えられる。一方、ヒステリシス損失に関しては、残留応力の影響が支配的であると考えられる。これらの結果から、打抜いたアモルファス合金は、渦電流損特性にはほぼ影響はなく、ヒステリシス損はやや増加すると言える。アモルファス合金は高速領域で鉄損削減を主目的として用いられることが多い。(1)式に示した通り、渦電流損は周波数が高いほど支配的となるため、高速モータで定格速度領域では、打抜きに伴う残留応力による鉄損増加の影響は顕著に表れないと考えられる。

Table 1. Specification of ring-cores

Name of Ring core	SS-C	SS-B	AA-C	AA-B
Iron core	silicon steel (20HX1300)		amorphous alloy (2605SA1)	
Steel Thickness	0.20mm		0.025mm	
Processing Method	Wire cut* After Laminated	Laminated After Blanking	Wire cut* After Laminated	Laminated After Blanking
Lamination factor	95.9%	96.9%	93.1%	90.8%

* The conductive elements of wire cut surface are removed with etching process

Table 2. Coefficients of the Steinmetz equation

	K_{hys}	K_{eddy}
SS-C	122.7	0.238
SS-B	144.7	0.287
AA-C	49.5	0.0307
AA-B	60.9	0.0233

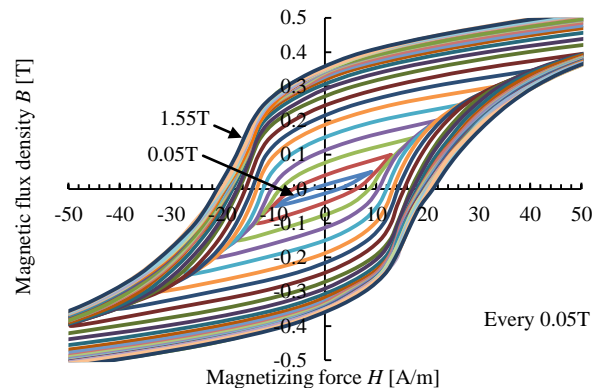


Fig. 1. Measured hysteresis loops of AA-B

Table 3. Characteristic of 20HX1300 and 2605SA1

	d [mm]	ρ [$10^{-6}\Omega\text{m}$]	K_{eddy}	κ
20HX1300(SS-B)	0.2	0.55	0.287	2.40
2605SA1(AA-B)	0.025	1.3	0.0233	29.5

3. BF値を用いないFEA手法

従来の電磁鋼板から求めたBF係数を用いた解析手法では、正確に鉄損を解析できていないとは言えない。加えて、2章で示した通り、打抜きの影響はヒステリシス損と渦電流損で異なり、これらは磁束密度や周波数依存性があるので、BF値に対して一定とはならない。そこで、本稿では、打抜いたアモルファス合金の鉄損特性の正確な把握を行うため、プレイモデルと均質化法により解析を行う。

〈3・1〉 **プレイモデル** 図1に測定したAA-Bのヒステリシス曲線を示す。プレイモデルは、マイナーループを再現する磁化モデルであり、ヒステリシスループの直流重量特性を考慮してヒステリシス損失を計算できる⁽⁶⁾。プレイモデルによる解析を行うためには、図1に示すような、振幅の異なるB-Hループ群を準備する必要がある。今回は、実験の都合上、ケイ素鋼板における測定範囲は0.05T~1.90Tとし、アモルファスにおける測定範囲は0.05T~1.55Tとした。これらの測定データをJMAG Designerに実装し、解析を行う。

〈3・2〉 均質化法 表3に、ケイ素鋼板(20HX1300)およびアモルファス(2605SA1)の物性比較を示す。均質化法では、鋼板の厚さ d と電気抵抗率 ρ から古典的な渦電流損失 $W_{\text{eddy_cla}}$ を計算する。ここで、 d と ρ の値はカタログ値を用いる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。この方法は、表皮効果を考慮して渦電流損を計算できる。なお、均質化法では、異常渦電流損失などの過剰損失を考慮できない。そのため、古典的な渦電流損失の修正係数 κ を、(2)式のように定義する⁽⁸⁾。

$$\kappa = \frac{K_{\text{eddy}} f^2 B_m^2}{(\pi f d B_m)^2} = \frac{K_{\text{eddy}}}{6\rho} \dots\dots\dots (2)$$

K_{eddy} は、2.2節で説明した、表皮効果を含まない渦電流損失の係数である。ここで、過剰損失 $W_{\text{eddy_ex}}$ を考慮した場合、渦電流損失 W_{eddy} は(3)式となる。

$$W_{\text{eddy}} = W_{\text{eddy_cla}} + W_{\text{eddy_ex}} = \kappa W_{\text{eddy_cla}} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、表皮効果および過剰損失を考慮した渦電流損失は、古典的な渦電流損失の解析値に修正係数 κ を掛けることによって求められる。表1に示すように、打抜きケイ素鋼板の κ は2.40 であるのに対し、打抜きアモルファス合金の κ は29.5 である。

4. SRM の設計と作製

表4に設計したSRMの仕様を、図2に製作したアモルファスSRMの写真を示す。『SS-SRM』と『AA-SRM』はそれぞれ20HX1300と2605SA1を打抜き加工した後に、接着積層して製作したSRMである。SS-SRMの層数は200枚、AA-SRMの層数は1600枚である。なお、2章で示した通り、モータを高速回転させることで打抜いたアモルファス合金の特性を活かせるため、12000r/minの高速モータを設計した。

5. SRM の実機評価

〈5・1〉 評価方法 入力電力および電流実効値はパワーメータ(PW3390, 精度±0.04%, 帯域幅200kHz, HIOKI), モータトルクはトルクメータ(UTMII-1Nm, 精度±0.01%, 帯域幅1kHz, UNIPULSE), 巻線温度は熱電対により測定した。モータ効率 η_m は入出力電力から(4)式で求まる。

$$\eta_m = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{T_{\text{out}} \omega_m}{P_{\text{in}}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 P_{out} は測定したトルク T_{out} と回転角速度 ω_m の積として計算される軸出力であり、 P_{in} は測定した入力電力である。なお、設計したSRMは小容量なモータのため、機械損失にはばらつきがある。そのため、SS-SRMとAA-SRMでは機械損失に個体差があり、(4)式では公正な比較ができない。そのため、(5)式に示すように機械損失を軸出力の一部と見なした効率 η_e を定義する。

Table 4. Specification of design SRMs

Name of motor	SS-SRM	AA-SRM
Iron core	20HX1300 (high grade silicon steel)	2605SA1 (amorphous alloy)
Number of layers	200 (cal.)	1600 (cal.)
Processing method	Laminated after Blanking	
Output power	70W	
Max speed	12000r/min	
Motor size	40mm × 40mm	



Fig. 2. Photograph of 70W-SRM made of blanked amorphous alloy foil.

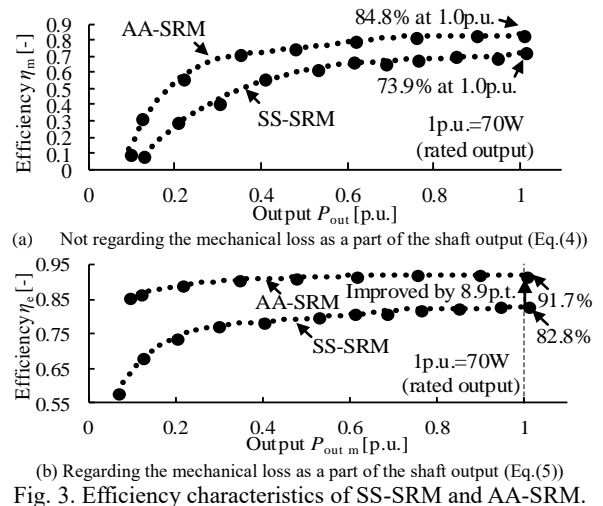


Fig. 3. Efficiency characteristics of SS-SRM and AA-SRM.

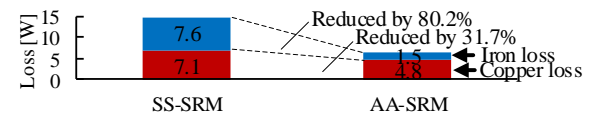


Fig. 4. Motor loss comparison between SS-SRM and AA-SRM of rated power (70W) at 12000r/min.

$$\eta_e = \frac{P_{\text{out_m}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{out}} + W_m}{P_{\text{in}}} = \frac{T_{\text{out}} \omega_m + T_{\text{mech}} \omega_m}{P_{\text{in}}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $P_{\text{out_m}}$ は、機械損失 W_m を軸出力と見なした軸出力である。なお、 W_m は、SRMで励磁せずに負荷モータで駆動した際に測定されたトルク T_{mech} と回転角速度 ω_m の積により算定する。一方、鉄損 W_i は、(6)式のように P_{in} から P_{out} 、 W_m 、および銅損 W_c を引き算することによって計算する。

$$W_i = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} - W_c - W_m$$

$$= P_{\text{in}} - T_{\text{out}} \omega_m - \sum_{x=u}^w R_x (t_{\text{temp}}) I_{\text{RMS_x}}^2 - T_{\text{mech}} \omega_m \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $R_x(t_{temp})$ は巻線温度 t_{temp} での x 相の巻線抵抗であり、 $I_{RMS,x}$ はそれぞれ x 相の実効値である。

(5・2) 実験結果 図 3 に SS-SRM と AA-SRM の 12000r/min でのモータ効率特性を示す。なお、図 3(a) は機械損失を軸出力と見なさない効率特性であり、図 3(b) は機械損失を軸出力と見なした効率特性である。AA-SRM のモータ効率はすべての出力範囲で SS-SRM のモータ効率よりも高くなった。図 3(a) より、AA-SRM は 1.0p.u. 出力時に最大 84.8% のモータ効率である。一方で、図 3(b) に示すように、機械損失を軸出力と見なした場合、AA-SRM のモータ効率は全出力範囲で 90% 程度であり、定格出力は 91.7% のモータ効率を達成した。さらに、この動作点で、AA-SRM のモータ効率は、SS-SRM と比較して 8.9p.t. 向上した。

図 4 に SS-SRM と AA-SRM の定格出力時の損失の比較を示す。図 4 から、AA-SRM は SS-SRM と比較して、銅損を 31.7% 低減でき、鉄損は 80.2% を大幅に低減できる。したがって、打抜いたアモルファス鋼板でも、モータコアに適用することで、大幅な鉄損改善効果があることがわかる。

(5・3) 実験結果と FEA の比較 図 5 に (a) SS-SRM と (b) AA-SRM の鉄損の測定結果と FEA 結果の比較を示す。SS-SRM および AA-SRM の測定結果と FEA 結果の間には、それぞれ約 17%, 14% の誤差がある。この誤差は、FEA 分析の精度と測定結果の精度に起因するものである。本解析では、SRM の特性は打抜きリングコアの特性のデータから決定している。しかし、打抜きの影響は、モータティースなどの複雑な部品ではリングコアの場合と同様であるとは限らない。また、測定結果の鉄損は、(6) 式により他の測定値から間接的に算出した値であり、漂遊負荷損失や交流銅損などを考慮しない損失のため、誤差が生じたと考えられる。

図 6 に (a) SS-SRM と (b) AA-SRM の定格出力における鉄損の分離結果を示す。SS-SRM では、全鉄損の内、渦電流損失が 69.3%、ヒステリシス損失が 30.7% となっている。一方、AA-SRM では、全鉄損の内、渦電流損失が 33.3%、ヒステリシス損失が 66.7% となっている。そのため、SS-SRM では渦電流損失が、AA-SRM ではヒステリシス損失が鉄損を支配的である。また、図 6(b) より、アモルファス合金では、ケイ素鋼板と比較して、渦電流損失は 1/10 程度、ヒステリシス損失は 1/2 程度であり、2.2 節と同等な鉄損削減量である。したがって、アモルファス合金を用いる高速モータにおいて、支配的な渦電流損失を劇的に低減できることが分かる。

6. 結論

本論文は、(a) 高品質低鉄損ケイ素鋼 20HX1300 と (b) アモルファス合金 2605SA1 を打ち抜いて作製したリングコアとワイヤーカットにより作製したリングコアの特性を明らかにした。また、(a) 高品質低鉄損ケイ素鋼板 20HX1300 と (b) アモルファス合金 2605SA1 を打ち抜いたコアを用いた SRM を製作し、以下のような特性を明らかにした。

(i) アモルファス合金はケイ素鋼板と比較して、渦電流損失を 1/10 程度、ヒステリシス損を 1/2 程度に低減できる。

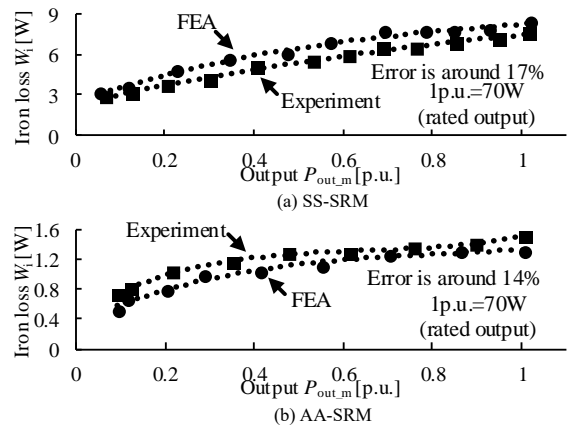


Fig. 5. Comparison results of measurement and FEA.

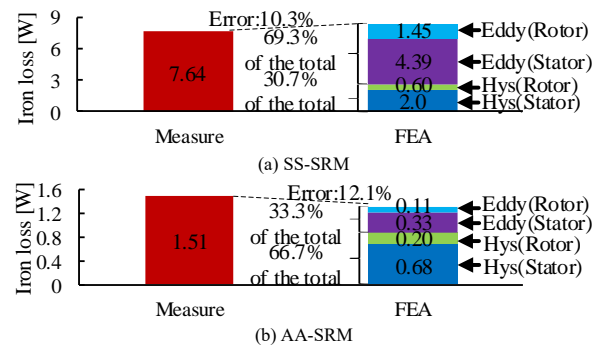


Fig. 6. Iron loss separation results at rated output (70W).

(ii) 打抜いたアモルファス合金は、渦電流損失特性にはほぼ影響はなく、ヒステリシス損はやや増加する。渦電流損失は周波数が高いほど支配的となるため、打抜いたアモルファス合金は高速モータが適すると考えられる。

(iii) 12000r/min の高速モータにおいて、打抜きアモルファスは打抜きケイ素鋼板と比較して、鉄損を 80.2% 低減でき、モータ効率を 8.9p.t. 改善した。

(iv) BF 値に頼らない解析により、(i) の鉄損削減量と同等に、アモルファス SRM はケイ素鋼板 SRM と比較して、渦電流損失が 1/10 程度、ヒステリシス損失が 1/2 程度である。

文献

- (1) R. Kolano, A. Kolano-Burian, K. Krykowski, J. Hetmańczyk, M. Hreczka, M. Polak, and Jan Szynowski "Amorphous soft magnetic core for the stator of the high-speed PMSM motor with half-open slots," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 6, no. 2003005 (2016)
- (2) A. Chiba, H. Hayashi, K. Nakamura, S. Ito, K. Tungpimolrut, T. Fukao, M. A. Rahman, and M. Yoshida "Test results of an SRM made from a layered block of heat-treated amorphous alloys," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 3, pp. 699-706 (2008)
- (3) 榎本裕治, 鈴木啓介, 沖田誠治, 江藤昂平, 片山英二: 『金型によって打抜き加工されたアモルファス鉄心を有するモータの実験評価』, 電学論 D, Vol.141, No.5, pp.423-430 (2021)
- (4) 一ノ倉理, 田島克文, 中村健二, 吉田征弘, 「磁気回路法によるモータの解析技術」, 科学情報出版, (2016)
- (5) T. Matsuo, D. Shimode, Y. Terada, and M. Shimasaki, "Application of stop and play models to the representation of magnetic characteristics of silicon steel sheet," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.39, no.3, pp.1361-1364 (2003)
- (6) NIPPON STEEL CORPORATION: NON-ORIENTED ELECTRICAL STEEL SHEETS, <https://www.nipponsteel.com/>
- (7) Hitachi Metals, Ltd.: AMORPHOUS ALLOY RIBBON Metglas, <http://www.hitachi-metals.co.jp/>
- (8) 山崎克巳, 谷田誠, 里見倫: 『電磁鋼板の渦電流を直接考慮した回転機の鉄損解析』, 電学論 D, Vol.128, No.11, pp.1298-1307 (2008)