アモルファス金属鉄心の低回転速度モータへの適用検証

Study of Applicability of Amorphous Core for Low Speed Motors

杉山 雄太^{*1}(正員), 王 卓男^{*1}, 榎本 裕治^{*1}(正員), 谷川 茂穂^{*1}(正員)

Yuta SUGIYAMA (Mem.), Zhuonan WANG, Yuji ENOMOTO (Mem.), Shigeho TANIGAWA (Mem.)

Amorphous metal has very low iron loss and is expected to improve the efficiency of electrical machine such as motors. In general, amorphous cores are thought to be more superior in high speed motors because iron loss increases with frequency and amorphous metal's low iron loss properties are effective in high frequency region. In this report, however, we studied applicability of amorphous cores for low speed axial gap motors and found that the superiority over electric steel 35A300 existed even in low speed motors. We designed the double rotor axial gap motor which the rated output is 750r/min and 2.0N·m and the amorphous core motor shows 3% efficiency superiority over magnetic steel core motor. Also we found that the difference of efficiency gets wider in low torque output.

Keywords: amorphous, core, motor, axial gap, ferrite, magnet, synchronous, iron loss, efficiency.

1 緒言

家庭内電化製品の普及や自動車の電動化の拡大といったことを背景に、エネルギー消費にモータが占める割合は増加しつつある。国内では電力消費の 50%以上をモータが消費しており[1], 従って持続可能な社会を目指す上で、モータの高効率化は重要な意味を持つ。

モータの高効率化はその損失の低減によるが、損失は大きく鉄損、銅損、機械損に分別できる。銅損はモータを構成している巻線の電気抵抗により発生する損失であり、その低減には界磁電流を不要とする永久磁石界磁モータの採用や、巻線の占積率を上げて低抵抗化を図るための角型銅線の採用が有効である。機械損は軸受部の摩擦や空気抵抗などの機械的な損失をいう。

また鉄損は、モータを構成している磁性材料が交流磁界を受けて内部の磁束密度が変化することに起因する損失であり、低減には磁性材料の低損失化が不可欠である。鉄損の低減に関してはモータに一般的に利用されている電磁鋼板に代わってさらに低損失なアモルファス金属を磁心に利用することで、モータの効率を上げる検討がなされている。アモルファス金属はその高い強度と薄い厚みにより鉄心への加工が難しめ、複雑な鉄心形状を持つラジアルギャップモータへの適用は困難である。一方、アキシアルギャップモータの鉄心は比較的単純な構造でよいこともあり、アモルフ

アス鉄心の適用検討が進められている[2-5]。一般に鉄損は周波数につれて増大するため、モータに適用した場合のアモルファス金属の優位性は電磁鋼板に比較し板厚が薄く高電気抵抗であることから高回転速度モータ程顕著であると考えられ、これらの報告も 1000 r/min 以上の高速回転をターゲットとしているが、モータの利用としてはファン用を初め 1000 r/min 以下の回転数での利用も多い。したがって比較的低速回転のモータにおいてアモルファス金属鉄心を適用した場合に効率がどの程度改善されるかについて検討することは十分に意味があることと思われる。本報告においては、ファン用を念頭にしたモータを試作し、低速回転域でのアモルファス金属鉄心の優位性について検討した。

2 鉄心

まず鉄心の製法について記述する。鉄心の材料としては Metglas 製アモルファス金属 2605SA1 及び比較のための電磁鋼板 35A300 を用いた。アモルファス金属は強度が非常に高く薄いため、打ち抜き加工による鉄心への積層は困難である。そこで供給されたリボンを短冊状に切断しそれを台形状に積層したのち樹脂で固める方法で鉄心を作成した。積層したコアの構造について Fig. 1 に示す。電磁鋼板についても同様の構造により鉄心を形成した。このように切断した後積層することで、積層時に歪が導入される部分を周辺部の切断面付近のみと極めて小さい範囲に止める事が出来るため、応力による鉄損増加を避けることが可能となり効率向上に有利と考えられる。

連絡先: 杉山 雄太, 〒319-1292 茨城県日立市大みか町 7-1-1, (株)日立製作所日立研究所,
e-mail: yuta.sugiyama.fcr@hitachi.com

^{*1} 日立製作所

Fig. 1 Structure of Strip-Lamination Core.

Table 1 Cores for Evaluation.

No.	Material	Structure	Heat Treatment
1	2605SA1	Strip Lamination	No
2	2605SA1	Strip Lamination	Yes
3	35A300	Strip Lamination	No

またアモルファス金属については、その鉄損低減に有効と思われる熱処理の影響を見るため、360℃1 時間の無磁場中熱処理を積層する前に行った鉄心と、熱処理を省略した鉄心を準備した。

以上の組合せで 3 種の鉄心を準備した。Table 1 に作成した鉄心の製法の組合せを示す。

3 モータ仕様

次に作製するモータの仕様について記述する。主な項目を Table 2 に記載する。まずモータの基本構造であるが、アモルファス金属を鉄心とするためアキシアルギャップ構造とし、鉄心をコイルで巻いたステータを界磁用永久磁石を張り付けたロータで上下を挟むツインロータ型を選択した。構造を Fig. 2 に模式的に示す。このような構造とすることで、ステータ部ではコイルが巻かれた鉄心以外のヨークが不要となり、鉄損を最小化することができる。また鉄心の上下にギャップを設けた構造とすることで、どちらか片側のみにギャップを設けた構造に比べ力が発生するギャップ面積が 2 倍となり、より多くのトルクを稼ぐことが出来、単位体積当たりのトルクを向上させることが出来る。低回転数での特性の確認が目的であり、試作においては定格回転数は 750 r/min、定格トルクを 2.0 N·m とし設計することにした。このとき出力は 157 W となる。モータの寸法としては、ロータの直径を 130 mm とし、非磁性ステンレス鋼製ケースに配置する構造とした。ロータはヨークと永久磁石とからなり、ヨークは厚み 5 mm で電磁鋼板製、永久磁石は厚み 5 mm の日立金属製フェライト焼結磁石 NMF12G 材を用い、外径 130 mm 内径 75 mm のリング状に配置している。ステータは積層構造の鉄心にコイルを巻き、樹脂で固めて一体にしたものをケースに固定する。

Table 2 Motor Specification.

Type	Axial Gap
Phase number	3
Stator Coil Number	12
Pole Number	14
Rotor Size	ϕ 130x75 mm
Rotor Yoke	Electrical Steel Sheet
Permanent Magnet	Sintered Ferrite Br=0.45T
Stator Coil	ϕ 0.75x372 turn
Air Gap	0.7 mm
Rated Speed	750 r/min
Rated Torque	2.0 N·m

Fig. 2 Structure of Axial Gap Motor.

4 モータ設計結果

まずモータの設計結果について記述する。設計においては鉄心は基準とする電磁鋼板 35A300 の材料データを用いて計算した。

4.1 誘起電圧

定格回転数におけるモータの無負荷誘起電圧に関して有限要素法にて計算した値を Fig. 3 に示す。回転数 750 r/min において線間誘起電圧は 157 Vrms である。また、このとき鉄心内部の最大磁束密度は 0.7 T となった。

4.2 トルク-電流関係

モータのトルクと電流特性の関係について有限要素法を用いて計算した。計算した結果を Fig. 4 に示す。トルクは電流にほぼ比例して増大しており、定格の 2.0 N·m まで飽和などの兆候は確認できない。トルク 2.0 N·m における電流は 0.6 Arms である。飽和している箇所の有無を確認するため通電電流を 1.0 Arms とした場合の磁束密度分布を計算したが鉄心部の最大磁束密度は 0.8 T 程度であり、試作の鉄心に用いるいずれの材料の飽和磁束密度に対しても十分に小さい値である。

Fig. 3 Calculated Induced Voltage at 750 r/min.

Fig. 4 Torque-Current relation.

Fig. 5 Motor Efficiency vs. Torque.

また無負荷の場合と比較しても 11%程度しか最大磁束密度は増加しておらず、本試作のようなリラクタンストルクを利用しないアキシシャルギャップモータにおいては、鉄心内部の磁束密度はほぼ永久磁石の界磁によって決まることがわかる。

4.3 モータ効率

Fig. 5 に数値計算で求めたモータ効率を示す。定格出力において、銅損 5.7 W 鉄損 2.5 W が見込まれ効率は 95%となった。

5 試作結果

5.1 試作モータ外観

Fig. 6 に試作した鉄心とコイル、それらを樹脂でモ

Fig. 6 Trial Motor.

ールドしたステータ及びモータ全体を示す。(a)は鉄心で、底面積は 350 mm^2 で、長さは 40 mm である。(b)はコイルで、 $\phi 0.75$ の銅線を 372 ターン巻いている。ステータ(c)はこれら鉄心をコイル中心に配置してステータ保持板で保持し、全体をモールドする構造とした。コイルの結線は、一相あたり 4 つのコイルを直列に接続した Y 結線である。(d)がロータであり、扇状の磁石をヨークである電磁鋼板製ヨーク上に貼りつけている。

5.2 線間の抵抗及びインダクタンス

Table 3 に作成したモータの線間の抵抗及びインダクタンスを示す。インダクタンスは LCR メータ(HIOKI 3522)を用いて測定した。試作したいずれのコアでも、抵抗及びインダクタンスはほぼ一定となっている。カタログでは電磁鋼板の初透磁率(10 A/m)が 1000 程度であるのに対し 2605SA1 は 7000 程、微分比透磁率も直流磁束密度を 0.7T に印加した状態で電磁鋼板が 10^4 以下であるのに対し 2605SA1 は 5×10^5 以上と大きな違いがあるにもかかわらず、鉄心の種類によらずほぼインダクタンスが一定であることは、鉄心材料の透磁率の影響は小さいことを示す。試作したモータの構造が永久磁石型であるため、インダクタンス測定においては実質的なギャップがエアギャップ部だけではなく、永久磁石もギャップとなりこの部分の磁気抵抗が大きい。鉄心部の磁気抵抗は高い透磁率からいずれの鉄心でもギャップ部の磁気抵抗に比べ非常に小さく、したがってインダクタンス測定時の磁気回路全体の磁気抵抗は

ほとんどエアギャップ部と永久磁石部によって決まるためである。また、いずれの線間でもインダクタンスが同じということから、試作したモータのバランスがよく取れていることがわかる。

5.3 誘起電圧

Table 4 に定格回転数時に線間に誘起される電圧を示す。誘起電圧も鉄心の材種によらず、ほぼ一定の値を示す。これも 4.1 節でインダクタンスが一定となった理由と同様、磁気回路の起磁力が同じ永久磁石であり、磁気抵抗のほとんどがギャップによってきまるため、鉄心を通る磁束が鉄心の種類を変えても同じであり、磁束の時間微分で決まる誘起電圧も同じになったと考えられる。

5.4 無負荷損失

次に無負荷損失を Fig. 7 に示す。無負荷損失は試作したモータを外部から駆動し、駆動トルクと回転数より求めた。定格回転数においてアモルファス金属鉄心で 2.1~2.9 W、電磁鋼板鉄心で 4.4 W となった。この損失の差は、電磁鋼板とアモルファス金属の鉄損の差のためであり、アモルファス金属が低損失であることを示すものと考えられる。

Table 3 Coil Inductance & Resistance.

Cores	U-V		V-W		U-W	
	L(mH)	R(ohm)	L(mH)	R(ohm)	L(mH)	R(ohm)
2605SA1 noHT	121.0	11.8	122.5	11.8	122.2	11.8
2605SA1 HT	120.1	11.8	121.9	11.8	121.8	11.8
35A300	122.2	11.9	121.0	11.9	122.3	11.9

Table 4 Induced Voltage.

Cores	U-V	V-W	U-W
2605SA1 noHT	157.1	156.9	156.3
2605SA1 HT	156.7	156.3	154.5
35A300	156.7	156.3	155.6

Fig. 7 No Load Loss.

5.5 モータトルク-電流特性

Fig. 8 に定格回転数で測定したモータのトルクと電流の関係を示す。モータの駆動には安川電機製インバータ(A1000)を用いた。いずれの鉄心においてもほぼ同一のトルク-電流関係を示す。定格出力トルクに必要な電流は 0.6 Arms となり、ほぼ設計通りである。

出力トルクが 1.0 N·m 以上の範囲では、トルクと電流はほぼ直線関係を示している。これは測定した範囲では磁気飽和が起きていない事を示している。

低トルクの 0.5 N·m において、必要電流が増えて若干直線からずれるのは、出力トルクによらない機械損や鉄損による一定の反トルクを打ち消すための電流が必要のためであると考えられる。無負荷損失の結果からはその値は電磁鋼板の場合で 56 mN·m、アモルファスの場合で 27~37 mN·m である。出力トルクが減少したため その影響が顕著に現れたためと考えられる。

5.6 モータ効率

Fig. 9 に試作したモータの定格回転数における効率とトルクの関係を示した。定格回転数 750 r/min 出力トルク 2.0 N·m において最も効率の良い鉄心は No. 1 (2605SA1 熱処理無) となり、96.4% となった。また No. 2 (2605SA1 熱処理有) においても、96.0% を達成している。この結果は熱処理無しの効率より低い結果

Fig. 8 Motor Torque vs. Current.

Fig. 9 Efficiency vs. Torque.

となった。しかし両者の効率差は小さく測定誤差の影響も考えられ、また無負荷損失の測定では熱処理有りの鉄心の方がわずかながらも低損失であることを示していることから、熱処理無しの方が高効率化に有利と結論づけることは難しい。一方、電磁鋼板による鉄心を用いたモータでは定格出力において効率 93.2%とアモルファス鉄心に比べ3%ほど低くなっている。

設計時に検討したように、定格ではいずれの鉄心材料においても飽和より十分小さい磁束密度で動作しており、また鉄心以外の条件については同一であるので電磁鋼板の効率が低い原因は、両者の鉄損の違いによるところが大きいと思われる。このことから、低速回転モータにおいても、電磁鋼板製鉄心に比べアモルファス金属製鉄心の優位性が示されたと考える。

また、Fig. 9 において 1.0 N・m 以下の低トルク側において特にアモルファス金属製鉄心の優位性が顕著になっている。これは低トルクでは駆動電流が小さくなるため巻線抵抗による銅損は低下する一方で、界磁を永久磁石で行っているため、低トルクとなっても鉄心に流れる磁束は永久磁石による磁束が主流となるため一定となる。このため無負荷時においても Fig.7 に示すように一定の鉄損が発生する。このため低トルクでは鉄損が小さいアモルファス金属の優位性が大きく出たものと考えられる。

次に Fig. 10 に出力トルクを定格の 2.0 N・m と一定にした場合の回転数とモータ効率の関係を示す。測定した回転数範囲においてアモルファス金属鉄心は電磁鋼板と比較して約 3%程度高い効率を保っている。低回転速度においては効率が低下しているが、これはトルクを一定にしたために必要な入力電流も一定となり、回転数が低下しても銅損が一定であるためである。Fig. 11 にトルクを 2.0 N・m と一定にして回転数を変化させた場合のモータへの入力電流を示す。定格回転数以下ではほぼ一定であることが確認できる。一方で鉄損は Fig. 7 の無負荷損失からも推定できるように回転数が低下するにつれて小さくなるため、効率への影響は銅損が支配的になる。このため前節の一定回転数低トルク化でアモルファス金属鉄心の優位性が顕著になるような現象は確認されない。

最後に鉄心に 2605SA1 熱処理無しのコアを用いたモータでトルクと回転数を変えながら測定したモータ効率の分布を Fig. 12 に示す。広範囲にわたり効率 90%を維持していることがわかる。

Fig. 10 Efficiency vs. Rotation Speed.

Fig. 11 Input Current vs. Rotation Speed.

Fig. 12 Efficiency Distribution for 2605SA1 no Heat Treatment Core.

6 結言

低回転速度ダブルロータ型アキシシャルギャップモータにアモルファス金属(2605SA1 熱処理無し及び熱処理有り)を鉄心に適用した場合の電磁鋼板(35A300)に対する優位性を検証し、次の知見を得た。

- (1) 今回試作したモータ設計ではアモルファス金属 2605SA1 の熱処理の有無にかかわらず電磁鋼板に対し定格出力で 3%程度の高効率化を達成できた。一方、アモルファス金属鉄心の熱処理については本検討で行った熱処理方法では、その有無によるモータ特性への影響は小さく、優位性は確定できなかった。

- (2) モータの効率は電磁鋼板製鉄心に比べアモルファス金属を鉄心に用いた場合には特に低トルク域で優位性が顕著になることが確認された。
 - (3) 一方、一定トルクで回転数を低下させてもアモルファス金属鉄心と電磁鋼板鉄心の効率の差にそれほど変化はないことが確認できた。
- (2012 年 9 月 28 日受付, 2013 年 4 月 26 日再受付)

参考文献

- [1] 電力使用機器の消費電力量に関する現状と近未来の動向調査, 富士経済, 2008.
- [2] 榎本裕治, 王卓男, 正木良三, 相馬憲一, 谷川茂穂, 板橋弘光, 産業用アモルファスモータの実用化に関する検討, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 4, pp.619-624, 2011.
- [3] Zhuonan Wang, Ryoso Masaki, Shigeki Morinaga, Yuji Enomoto, Hiromitsu Itabashi, Motoya Ito, Shigeho Tanigawa, Development of an Axial Gap Motor With Amorphous Metal Cores, IEEE Tans. Ind. Appl., Vol. 47, No. 3, pp. 1293-1299, 2011.
- [4] 榎本裕治, 王卓男, 正木良三, 相馬憲一, 谷川茂穂, 板橋弘光, 鉄基アモルファス鉄心を応用した高速度モータ, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 2, pp.384-389, 2011.
- [5] G. S. Liew, N. Ertugrul, Wen Liang Soong and J. Gayler, An Investigation of Advanced Magnetic Materials for Axial Field Brushless Permanent Magnet Motor Drives for Automotive Applications, *Proceedings of 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp.1-7, 2006.