

地球温暖化防止が期待できる 高効率アモルファスモーター

Highly Efficient Amorphous Alloy Based Motor to Mitigate Global Warming

木村 守*
Mamoru Kimura

日本の電力消費の約6割を占めると言われているモーターの高効率化は、省エネルギー化に大きく貢献すると考えられ、さまざまな高効率モーターの検討が進められている。そのような中、当社製の鉄基アモルファス金属 (Metglas® 2605HB1M) は、鉄損が低い特長がありモーターの高効率化に貢献すると考えられるが、加工技術に課題を有しておりモーターへの採用事例はまだ少ない。そこで、当社は島根大学次世代たたら協創センター (NEXTA) とともに鉄基アモルファス金属のモーターへの適用について研究を進めている。今回、鉄基アモルファス金属をモーターへ適用した際の特長を確認するため、ファンモーターとドローン用モーターにおいて、アモルファスコアと珪素鋼板コアを同様のワイヤ放電加工にて製作、コアの違いによるモーター性能比較を実施した。その結果、鉄基アモルファス金属を採用することで効率が珪素鋼板機に比べて向上し、特に軽負荷では10%以上向上することを確認した。

To achieve a sustainable society, reducing energy consumption is becoming an important issue. Consequently, there is a need to improve the efficiency of motors, which account for about 60% of Japan's power consumption. Our iron-based amorphous alloy strip (Metglas® 2605HB1M) is characterized by low iron loss, and is expected to contribute to improved motor efficiency. However, it is difficult to manufacture due to its thinness and high hardness. As a first research step, we report the results of manufacturing iron-based amorphous cores and silicon steel cores for fan and drone motors, and comparing their performance in actual motors. It was found that the adoption of amorphous cores resulted in a higher efficiency of 10% or more, especially under light load conditions.

*
株式会社プロテリアル
機能部材研究所
島根大学
次世代たたら協創センター
Functional Components
Research Lab., Proterial, Ltd./
Shimane University
Next Generation TATARA
Co-Creation Centre

■ Key Words : 鉄基アモルファス金属, モーター, 鉄損
■ Production Code : 鉄基アモルファス金属, Metglas®, 2605HB1M

■ R&D Stage : Prototype

1. 緒言

2015年9月の国連サミットで「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され、そこに記載された2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標であるSDGs(Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標)や、国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)などにより、持続可能な社会を作るため省エネルギーの要求が高まっている。例えば、日本において2018年度のCO₂排出量10.6億トンの約半分に当たる約4.5億トンは電力によって排出している。この電力消費のおよそ6割を占める¹⁾、²⁾モーターの高効率化は、省エネルギー化に大きく貢献すると考えられ、高効率モーターの検討が進められている³⁾、⁴⁾。

そのような中、モーターの高効率化に向けて鉄心材料に着目し、鉄基アモルファス金属や高Bsナノ結晶材を利用したモーターの検討がなされている⁵⁾ - ¹⁰⁾。鉄基アモルファス金属は、変圧器用途では多く採用されているが、モーター用途での量産化事例¹¹⁾はまだ少ない現状にある。これは、鉄基アモルファス金属は、熔融合金を約100万°C/秒で急冷固化した図1に示すような厚さ25 μmの薄帯で製造されるため、硬くて薄い特徴を有する。そのため従来材の珪素鋼板でモーターを作る際に用いられる、打抜き加工が困難という課題がありモーターの大規模な量産には至っていない。



図1 鉄基アモルファス合金薄帯(公称板厚: 25 μm, 標準幅: 142 mm, 170 mm および 213 mm)

Fig.1 Fe-based amorphous alloy strips (nominal thickness: 25 μm, standard widths: 142 mm, 170 mm, 213 mm)

このような課題を解決するために、当社と島根大学次世代たたら協創センター(NEXTA)を中心とする研究グループでは、鉄基アモルファス金属の難加工性の課題を解決し、アモルファスモーターコアの量産化への検討を進めている¹²⁾。今回、アモルファスモーター検討の第一段階として、打抜き加工のベースとなる直径50 mmのファンモーターとドローン用モーターを設計し、アモ

ルファスコアと珪素鋼板のコアを同様のワイヤ放電加工にて製作し、コアの違いによるモーター性能比較を実施した結果を報告する。

2. ファン用アモルファスモーター

2.1 ファンモーター設計例

今回検討したモーター仕様を図2および表1に示す。ステータコアを鉄基アモルファス金属(当社製 Metglas® 2605HB1M, 以下アモルファス)と珪素鋼板(日本製鉄株式会社ハイライトコア® 35H300, 以下珪素鋼板)にて検討した。なお、ロータコアは永久磁石の直流磁場の領域となるため、共通の35H300とし、永久磁石はネオジウム・鉄・ボロン系焼結磁石(当社製 NEOMAX® NMX-43SH)を採用した。

磁界解析には、ムラタソフトウェア株式会社の汎用有限要素法解析ソフトFemtet®を利用した。本検討の解析条件を表2に示す。電流は3.2 Aとなるように調整し、巻線仕様も同一のため銅損は一定とした。解析における鉄損は、材料の鉄損値(W/m³)をベースに(1)式に示すシュタインメッツの式であらわされる、ヒステリシス損係数K_hと渦電流損係数K_eを入力する。今回の材料データ入力値は、珪素鋼板はFemtet内の値を使用し、アモルファスは素材の実測データをもとに(K_h:27.0477, K_e:0.023456)とした。

$$W = K_h \cdot B^{1.6} \cdot f + K_e \cdot B \cdot f^2 \quad (1)$$

表2に損失解析結果を、表3にトルク解析結果を示す。表2に示すように、ステーターの鉄損は1,000 min⁻¹では、アモルファス機が珪素鋼板機の約1/3, 10,000 min⁻¹では、約1/7となる。銅損を含めた全損失は、1,000 min⁻¹では、アモルファス機と珪素鋼板機はほとんど変わらないが、10,000 min⁻¹では、約1/3となる。これらより、鉄基アモルファス金属の特長である高周波での鉄損低減が見込めることがわかる。

表3のトルクを見ると電流値を増加するにつれて、アモルファス機と珪素鋼板機の差が増え、3.2 Aでは珪素鋼板機に対してアモルファス機のトルクが約95%となることがわかる。図3にアモルファス機と珪素鋼板機の3.2 A時の磁界解析結果を示す。図3より、ティース部の磁束密度が約1.5 T程度となっており、アモルファス機の飽和磁束密度1.53 Tに到達していると考えられ、この磁気飽和の影響でトルクが低下していると考えられる。

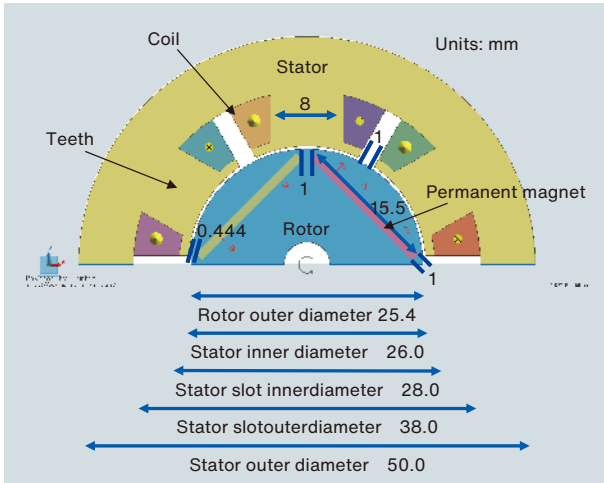


図1 モーター 1/2 断面図

Fig.1 Cross-section of half motor

表1 モーター仕様

Table 1 Motor specifications

Item	Value
Stator Outer Diameter	50 mm
Rotor Outer Diameter	25.4 mm
Gap	0.3 mm
Length	50 mm
Rated Power	30 W (at 1,000 min ⁻¹) 300 W (at 10,000 min ⁻¹)
Voltage	Max. 200 V
Current	Max. 3 A
Application	Drone, Fan, Pump

表2 損失解析結果

Table 2 Simulation results (loss)

Speed (min ⁻¹)	Material	Copper Loss (W)	Stator Iron Loss (W)	Rotor Iron Loss (W)	Total Loss (W)
1,000	Amorphous	3.06	0.14	0.01	3.22
	Si steel	3.06	0.50	0.02	3.58
10,000	Amorphous	3.06	1.75	0.29	5.11
	Si steel	3.06	12.22	0.32	15.60

表3 トルク解析結果

Table 3 Simulation results (torque)

Material	Current		
	0.8 A	1.6 A	3.2 A
Amorphous	0.214 Nm	0.439 Nm	0.868 Nm
Si steel	0.219 Nm	0.448 Nm	0.914 Nm

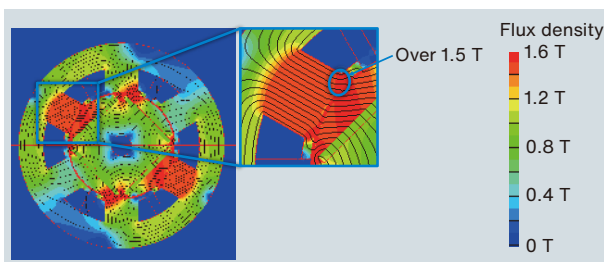


図3 磁界解析結果 (磁束密度)

Fig.3 Simulation results (flux density)

2.2 実測結果

図4に作成したモーターの外観図を示す。同図(a)(b)のように外観は同一となっている。図5に無負荷試験と、負荷試験の構成を示す。無負荷試験は、図5(a)に示すように、試験対象であるΦ50 mmモーターの端子に電圧計を接続し、駆動モーターで回転させることで試験する。この時、駆動モーターとΦ50 mmモーターの間に、トルクメーターを設置することで、トルクと回転速度を計測する。このトルクと回転速度がΦ50 mmモーターの機械損と鉄損を合わせた無負荷損失となる。また、Φ50 mmモーターの端子は電圧計のみに接続し、無負荷誘導起電力を測定した。今回、トルクメーターの最高回転速度が6,000 min⁻¹のため、試験は6,000 min⁻¹までとした。

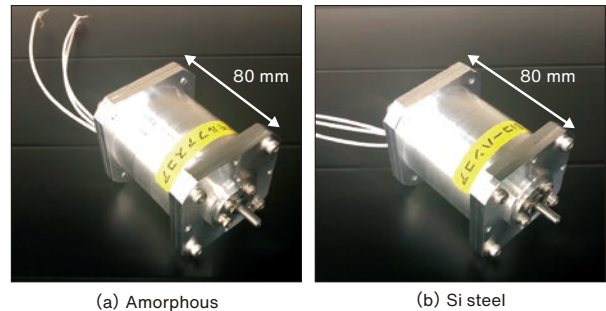


図4 試作モーター外観 (a) アモルファス機 (b) 珪素鋼板機

Fig.4 Photographs of (a) prototype amorphous motor, (b) Si steel motor

負荷試験は、図5(b)に示すように試験対象であるΦ50 mmモーターを、ヒステリシスブレーキに直結し、汎用インバータにて駆動した。汎用インバータで周波数指令を出し速度制御し、ダイナモメーターでトルクを加えることで、負荷試験を実施した。汎用インバータとΦ50 mmモーターの間にはパワーメーターを設置し、モーターの入力電圧、電流を計測することで入力電力を把握し、ダイナモメーターでトルクと回転速度を計測することで出力を計測して効率を算出した。今回、試験装置の許容回転数とトルクが6,000 min⁻¹、0.4 Nmのため、その範囲内での試験を実施した。

図6に無負荷損失試験結果を示す。前項で説明したように、無負荷損失には機械損と無負荷鉄損が含まれる。今回回転数が同一であり、ステーター形状が同一であることから、機械損はアモルファス機と珪素鋼板機で変わらないと考えられる。同図より、アモルファス機と珪素鋼板機の無負荷損失を比べると、アモルファス機は珪素鋼板機の約1/6となっていることがわかる。これは前章において、磁界解析にて検討した際、鉄損が約1/7と

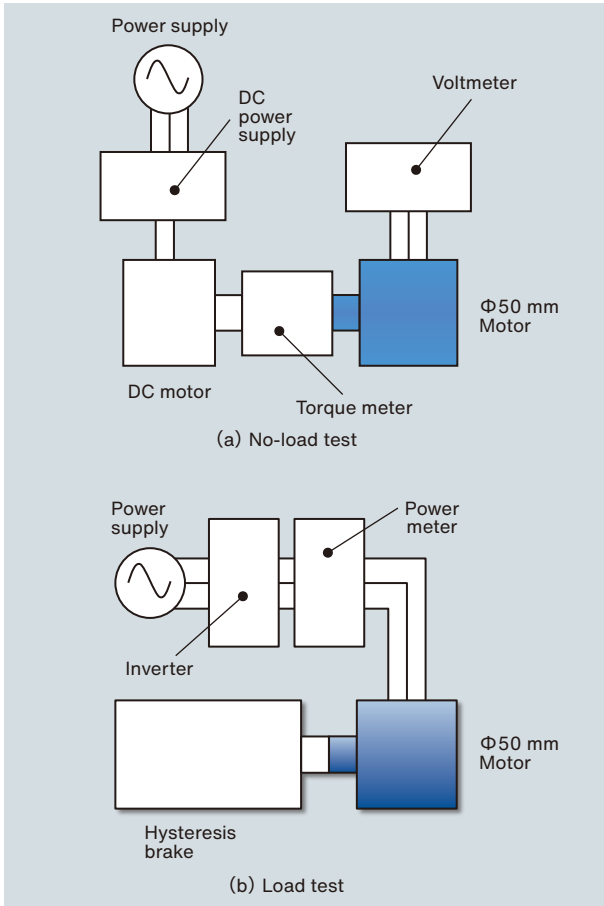


図5 試験構成 (a) 無負荷試験 (b) 負荷試験

Fig.5 Test system (a) No-load test, (b) Load test

なっていたため、機械損を含めるとほぼ計算結果通りと考える。

図7に、 $6,000 \text{ min}^{-1}$ の、アモルファス機と珪素鋼板機のトルクに対する効率を比較した。アモルファス機の効率が珪素鋼板機を上回っていることがわかる。特に、 0.15 Nm 以下において10ポイント以上アモルファス機の効率が低い。これは、低負荷側ではほぼ鉄損が支配的であるため、コアの鉄損の影響が表れているためと考える。また、トルクを増加すると、アモルファス機と珪素鋼板機の差が減少している。以下損失分離について検討する。

図8に、 $6,000 \text{ min}^{-1}$ の、アモルファス機と珪素鋼板機のトルクに対する銅損を比較した。トルクが増加するにつれて銅損が増加するが、アモルファス機と珪素鋼板機の差はほとんどないことがわかる。

図9に、 $6,000 \text{ min}^{-1}$ において全損失から銅損を差し引いた結果を示す。この損失は、機械損と鉄損、その他分類できない損失が含まれている。各回転速度のアモルファス機の損失が珪素鋼板機を下回っており、コアの鉄損の影響が表れ図7に示した効率の差になっていると考える。トルクを 0.4 Nm まで増加すると、アモルファス

機と珪素鋼板機の損失差が減少しており、これは電流増による銅損が増加し、鉄損低減効果が低下していくためである。

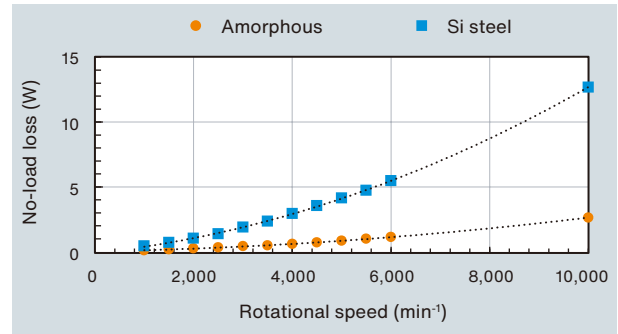


図6 無負荷損失結果

Fig.6 Dependence of no-load loss on rotational speed

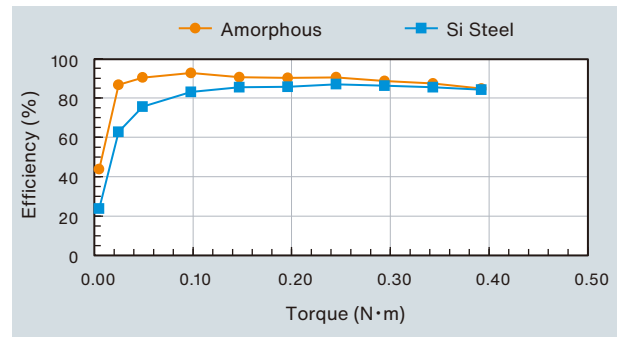


図7 トルク-効率特性 ($6,000 \text{ min}^{-1}$ 時)

Fig.7 Torque-efficiency characteristics at $6,000 \text{ min}^{-1}$

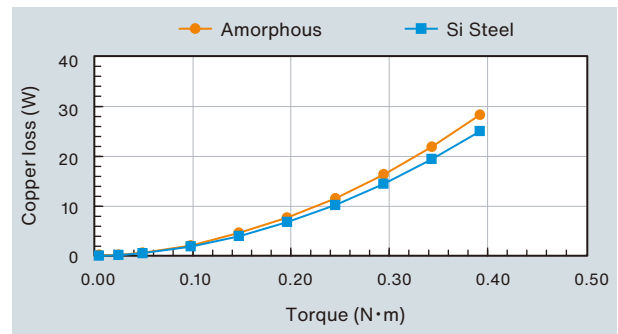


図8 銅損特性 ($6,000 \text{ min}^{-1}$ 時)

Fig.8 Copper loss characteristics at $6,000 \text{ min}^{-1}$

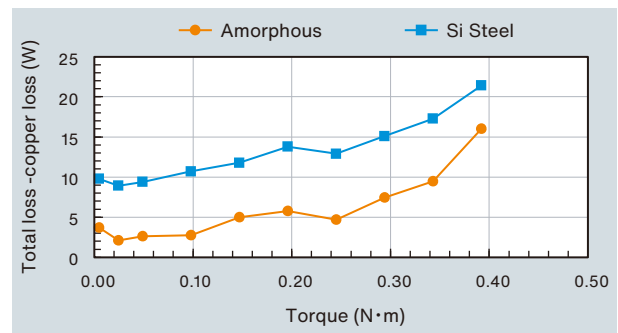


図9 全損失から銅損を除いた損失 ($6,000 \text{ min}^{-1}$ 時)

Fig.9 Total loss minus copper loss characteristics at $6,000 \text{ min}^{-1}$

3. ドローン用アモルファスモーター

3.1 ドローン用モーター設計例

市販のドローン用モーターに体格を合わせた28極のモーターを、アモルファスと珪素鋼板でステーターを作成した。表4に基本仕様、表5に寸法諸元を、図10に28極機の1/2断面図と寸法諸元の凡例を示す。28極化することで、 $6,000 \text{ min}^{-1}$ 時に1.4 kHzの駆動周波数となり、鉄基アモルファス金属の高周波鉄損が低い特長を活

表4 ドローン用モーター基本仕様

Table 4 General specifications of drone motor

Item	Value
Rated Power	1,300 W
Voltage	12.6-33.6 V
Current	Max 44 A

表5 ドローン用モーター寸法諸元

Table 5 Detailed specification of drone motor

Item	Si steel	Amorphous
Core material	35H300	HB1M
Poles	28	28
Slots	24	24
Rotor outer diameter	60.7 mm	60.7 mm
Rotor inner diameter	56.2 mm	56.2 mm
Stator outer diameter	55.6 mm	55.6 mm
Stator inner diameter	20 mm	20 mm
Gap	0.3 mm	0.3 mm
Teeth width ①	3.1 mm	3.1 mm
Teeth width ②	2.2 mm	2.2 mm
Magnet size	5.8 × 1.25 × 12.0 Arc type R28.1 mm	5.8 × 1.25 × 12.0 Arc type R28.1 mm
Turns	5 Turns/Teeth	5 Turns/Teeth
Core length	12 mm	12 mm

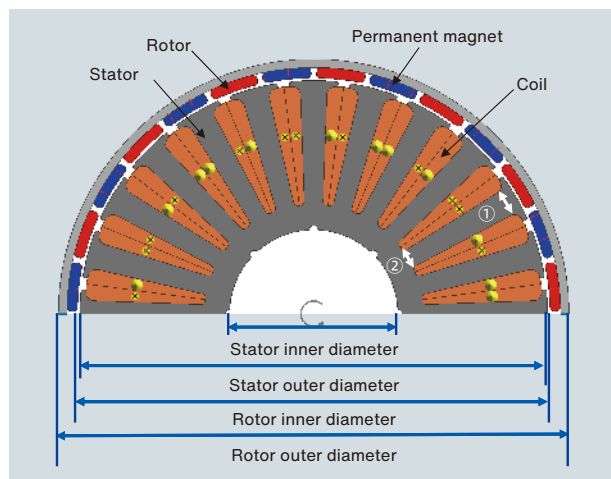


図10 ドローン用モーター 1/2 断面図

Fig.10 Cross-section of half drone motor

かすことが期待できる。図11に試作モーターの外観を示す。ファンモーターと同様に、外観は珪素鋼板機とアモルファス機で同一である。



図11 ドローン用モーター試作機外観 (モーター外径 60.7 mm)

Fig.11 Photograph of drone motor (motor outer diameter: 60.7 mm)

3.2 実測結果

実測は、2章で説明した試験装置にて実施した。図12に無負荷試験結果を示す。無負荷損失には機械損と無負荷鉄損が含まれる。回転子が同一であり、ステータ形状が同一であることから、機械損はどの機種でも変わらないと考える。同図より、アモルファス機と珪素鋼板機の無負荷損失を比べると、アモルファス機は珪素鋼板機の約1/4となっていることがわかる。

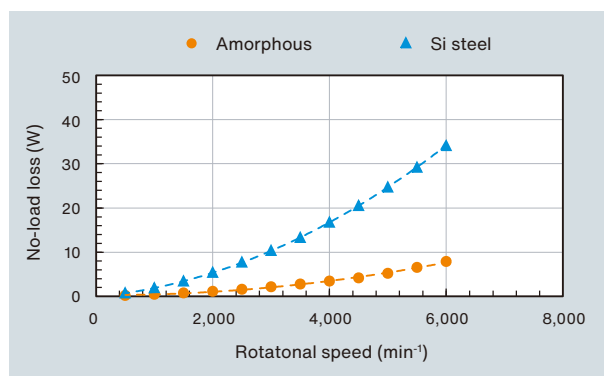


図12 無負荷損失結果

Fig.12 Dependence of no-load loss on rotational speed

図13に、 $6,000 \text{ min}^{-1}$ の、アモルファス機と珪素鋼板機のトルクに対する効率を比較した。全領域にてアモルファス機の効率が珪素鋼板機を上回っていることがわかる。特に、0.1 Nm以下においてアモルファス機の方が、20ポイント以上、最大37.8ポイント効率が低い。軽負荷高周波領域では鉄損の全損失に占める割合が高く、コアの差が大きく表れたと考える。

2章ファンモーターの結果と合わせて高周波ではアモルファス機を採用することで高効率化が図れることを示した。また、鉄損より銅損が大きい動作点ではアモルファス機と珪素鋼板機の効率差が減少するため、アモルファス機を活用するには適切な運転領域を選択する必要がある。ドローン用モーターのような可変速モーターにおいては一定の負荷で動作しているわけではなく、ホバリングのような軽負荷領域の動作が多い使い方では、アモルファス機によりトータルの運転時間を延ばす効果が見込まれる。

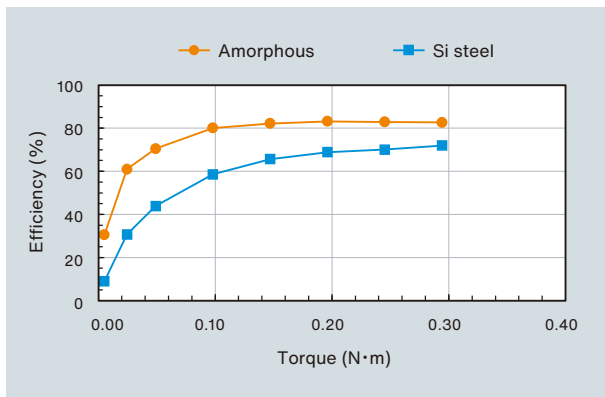


図13 トルク-効率特性 (6,000 min⁻¹ 時)

Fig.13 Torque-efficiency characteristics at 6,000 min⁻¹

4. 結言

アモルファスモーター検討の第一段階として、打抜き加工のベースとなる直径50 mmのファンモーターとドローン用モーターを設計し、アモルファスコアと珪素鋼板のコアを同様のワイヤ放電加工にて製作し、コアの違いによるモーター性能を比較した。無負荷試験により、アモルファス機と珪素鋼板機の無負荷損失を比べると、アモルファス機は珪素鋼板機の約1/4~1/6となっていることを示した。負荷試験において、アモルファス機の効率が珪素鋼板機を上回っていることを示した。特に軽負荷領域においては、アモルファス機とすることで、効率が10%以上高く、損失分離の結果、コア鉄損の差が効率差に寄与していることを示した。以上より、アモルファスコアを採用することで高効率化が可能なことを示し、運転条件によって性能が変化することを示した。今後は、打抜き加工の検討を進めることで、打ち抜きコアによるモーターを試作し評価することで、アモルファスモーターのさらなる実用化を目指す。

5. 謝辞

この研究は島根大学次世代たたら協創センター(NEXTA)より助成を受けている。

引用文献

- 1) 財団法人新機能素子研究開発協会:「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(2009)
- 2) 財団法人エネルギー総合工学研究所:平成21年度省エネルギー設備導入促進指導事業(エネルギー消費機器実態等調査事業)報告書(2010)
- 3) 貝塚正明, 立花武, 小坂卓, 道木慎二, 太田豊:「自動車の電動化における最新技術動向」, 電学論D, Vol. 139, No. 6, p.535-542(2019)
- 4) 深山義浩, 栢山盛幸, 渡辺教弘, 相澤淳一, 大穀晃裕, 椋木康滋, 渡部一喜, 石塚充, 一法師茂俊:「自動車用水冷式モーター・インバーター一体駆動システム」, 電学論D, Vol. 139, No. 6, p.543-549(2019)
- 5) 榎本裕治, 床井博洋, 今川尊雄, 鈴木利文, 小俣剛, 相馬憲一:「国際高効率規格IE5レベルを達成したアモルファスモーター ~IE3&IE4高効率モーターの開発に向けて」, 日本AEM学会誌, Vol. 24, No. 3, p.258-263(2016)
- 6) 榎本裕治:「ラジアルギャップ型アモルファス金属鉄心モーターの基礎検討」, 電学論D, Vol. 139, No. 6, p.606-611(2019)
- 7) Z. Wang, Y. Enomoto, M. Ito, R. Masaki, S. Morinaga, H. Itabashi, S. Tanigawa : Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores, IEEE Trans. on Magn., Vol. 46, No.2, p.570-573, (2010)
- 8) 榎本 裕治, 出口 見多, 今川 尊雄:「国高Bsナノ結晶合金を適用した究極高効率モーターの開発」, 電学論D, Vol. 139, No. 5, p.488-494(2019)
- 9) 牧野彰宏:超低磁心損失・高鉄濃度軟磁性合金「NANOMET」の最新研究開発動向, あたりあ, Vol.55, No.3, p.89-96 (2016)
- 10) 野中 剛, 瀬々 真吾, 牧野 省吾, 大戸 基道:「ナノ結晶軟磁性材料ステータコアを有するモーターの研究」, 電学論D, Vol. 139, No. 10, p.873-879(2019)
- 11) 株式会社日立産機システムホームページ:https://www.hitachi-ies.co.jp/products/cmp/scroll_oilfree/amorphous/index.html
- 12) 島根大学次世代たたら協創センターホームページ:<https://tatara.shimane-u.ac.jp/project/>



木村 守
Mamoru Kimura
株式会社プロテリアル
機能部材研究所
パワーエレクトロニクス研究部/
島根大学
次世代たたら協創センター
博士(工学)