

ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの特性検証

Investigating Characteristics of SMC-based SR Motor Manufactured by using Wire Electric Discharge Machining

三ツ谷和秀[†]・中村健二

東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

K. Mitsuya[†], K. Nakamura

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

Soft magnetic composite (SMC) is expected to be a next-generation motor cores since it has three-dimensional magnetic isotropy and excellent high-frequency characteristics. However, a metal die is required to manufacture an SMC-based motor core, which results in high costs. In particular, in the prototype evaluation stage, the high costs prevent the use of various cut-and-try procedures. This paper investigates the characteristics of an SMC-based SR motor manufactured by using wire electric discharge machining from an SMC bulk body.

Key words: Switched reluctance (SR) motor, Soft magnetic composite (SMC), Wire electric discharge machining

1. はじめに

自動車, 航空, 土木建築など, 様々な分野で電動化が進む現代において, その原動力であるモータの需要は高まる一方でであり, 現在では日本の総発電電力の 50~60%がモータで消費されている. したがって, 持続可能型社会の実現には, モータの高性能化・高効率化が必須であり, 特に最近では高速回転化による高出力密度化に注目が集まっている. しかし, このような高速モータの開発は決して容易では無い. 例えば, 鉄損はモータの高速化に伴い, 速度の 1~2 乗で増大する. したがって, 高速モータの設計では, 高周波で低鉄損な鉄心材料を採用するなど, 鉄損低減の工夫が必要である. これに対して, 圧粉磁心 (Soft Magnetic Composite: SMC) は, 高周波鉄損の低さから高速モータへの適用性も高く, 3 次元磁気等方性の性質も相まって, 次世代のモータ鉄心材料の一つとして期待されている. このような背景から実用化に向け, 圧粉磁心のモータへの適用に関する検討が国内外で進められているが¹⁻⁵⁾, 通常, 圧粉磁心を用いたモータ鉄心製作には, 高価な金型が必須であり, これが特に検討初期段階での試作評価の足かせとなっている.

そこで筆者らは, この課題を解決すべくワイヤ放電加工によるモータ鉄心製作に着目した. すなわち, 圧粉磁心のバルク体からワイヤ放電加工機を用いて, モータ鉄心を切り出すことで, 金型を必要としない圧粉磁心モータの製作可能性を検討した. ここでワイヤ放電加工とは, 被加工物とワイヤの間の放電現象による熱を利用し, 対象物を融解, 切断する加工法であり, 圧粉磁心を用いた場合, この熱によって切断面周辺の磁粉の絶縁皮膜が破壊され, 隣接する磁粉同士が電気回路的につながって電流路を形成し, 渦電流損が増大する恐れがある. したがって, ワイヤ放電加工を用いた圧粉磁心モータ製作の有用性を検証するためには, ワイヤ放電加工による圧粉磁心の磁気特性劣化を定量的に評価する必要がある.

そこで本論文では, スイッチトリラクタンス (SR) モータを考察対象に選んだ. 理由は, SR モータが磁石レスモータであり, 軟磁性材料の磁気特性がモータ特性に反映され易いためである. 本論文では, 実際に圧粉磁心 SR モータを試作し, 実験と解析の両面から種々の検討を行ったので報告する.

2. 圧粉磁心 SR モータの特性算定

2.1 圧粉磁心の磁気特性

圧粉磁心とは, 表面に薄い絶縁膜が施された軟磁性粉末を圧縮成形した磁心であり, モータ鉄心として一般的な無方向性ケイ素鋼板と比べ, 渦電流経路が短く, 高周波鉄損が小さいという特長を有する. Fig. 1 および Fig. 2 に, 考察に用いた圧粉磁心の $B-H$ 曲線と鉄損曲線を示す. また比較として, 一般的な無方向性ケイ素鋼板である 35A300 の特性も同図中に示す. まず Fig. 1 の $B-H$ 曲線を見ると, 圧粉磁心は 35A300 に比べて低磁束密度であることがわかる. しかしその一方で, Fig. 2 の鉄損曲線を見ると, 特に高周波域で圧粉磁心は 35A300 よりも低鉄損であることがわかる.

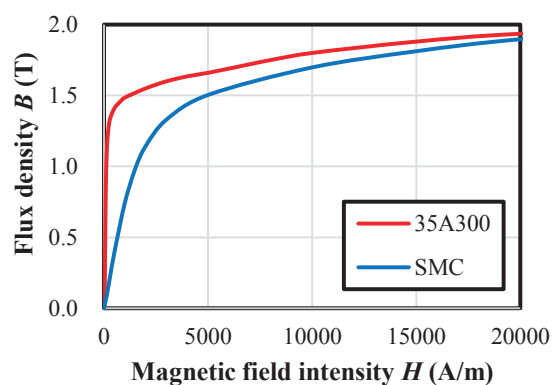
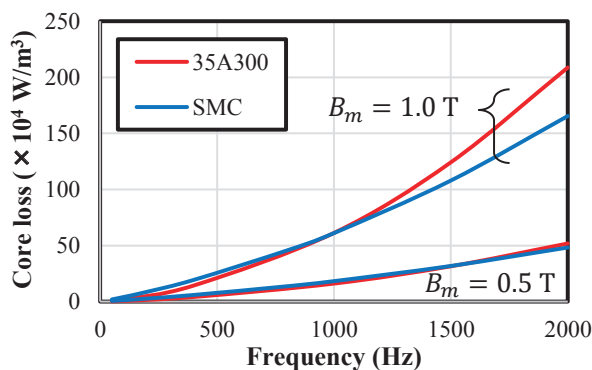
Fig. 1 $B-H$ curves of core material.

Fig. 2 Core loss curves of core material.

2.2 圧粉磁心 SR モータの特性算定結果

Fig. 3 に、本論文での考察に用いた SR モータの諸元を示す。本 SR モータは固定子 12 極、回転子 8 極の 3 相機であり、先行研究において電動工具用モータとして開発したものである⁶⁾。

以下では、3次元有限要素法 (3D-FEM) による電磁界解析を用いて、圧粉磁心を本 SR モータに適用した場合の特性算定結果について述べる。なお、3D-FEM には、(株)JSOL の JMAG Designer Ver 19.1 を用いた。

まず Fig. 4 および Fig. 5 に、トルク対速度特性と巻線電流密度対トルク特性をそれぞれ示す。まず Fig. 4 より、速度特性は両者ともにほぼ同等であることがわかる。次いで Fig. 5 を見ると、トルク特性は圧粉磁心の方が劣っていることがわかる。これは Fig. 1 に示した圧粉磁心の磁化特性の低さに起因している。

続いて、Fig. 6 に損失特性の比較を示す。なお、鉄損は FEM で求めた各要素の磁束密度波形からスタインメッツの実験式に基づき、後計算で算定した。まず銅損を見ると、Fig. 5 のトルク特性の低さに起因して圧粉磁心の方が劣ることがわかる。しかしその一方で、鉄損は圧粉磁心の方が優れていることがわかる。これは本 12/8 SR モータの動作周波数が 1 ~ 3 kHz であり、圧粉磁心の高周波鉄損の低さが表れる領域であるためである。

最後に、Fig. 7 に効率特性を示す。この図より、先ほどの損失特性を踏まえると、銅損が支配的となる中～高負荷側では、圧粉磁心 SR モータの効率は 35A300 に劣るものの、鉄損の占める割合が大きい軽負荷側では 35A300 と同等の効率を示していることがわかる。次章では、本 SR モータの試作試験結果について述べる。

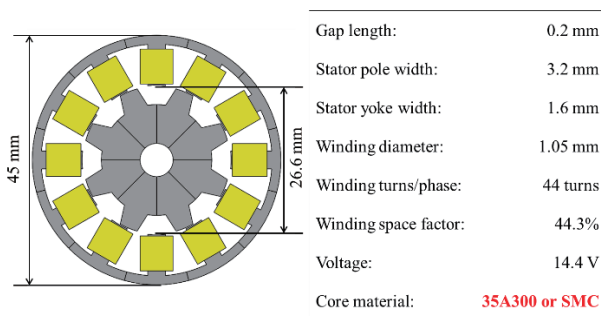


Fig. 3 Specifications of 12/8-pole SR motor.

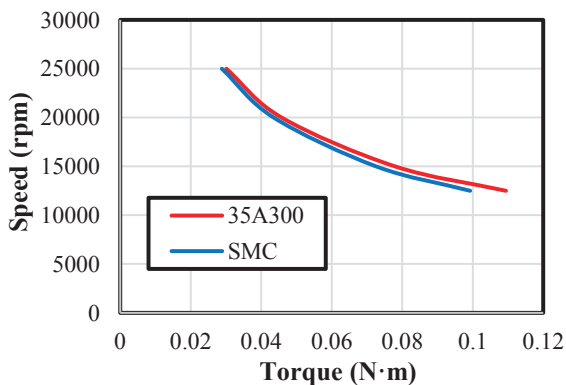


Fig. 4 Comparison of torque versus speed characteristics.

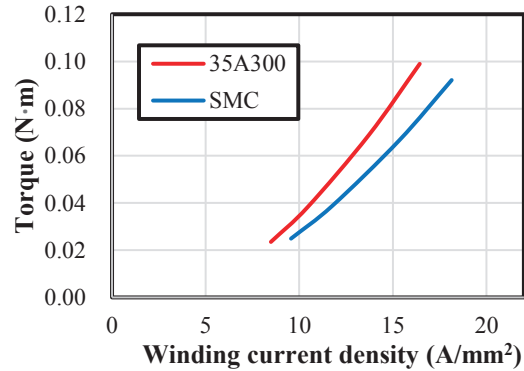


Fig. 5 Comparison of winding current density versus torque characteristics.

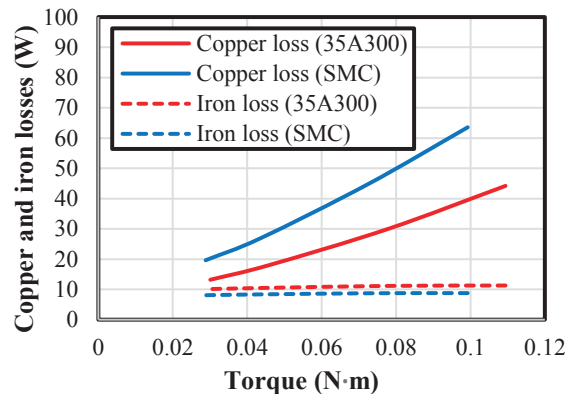


Fig. 6 Comparison of copper and iron losses.

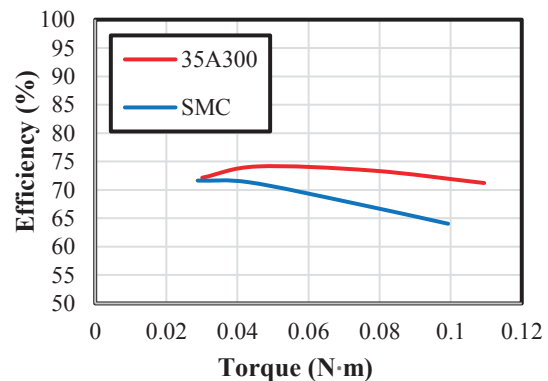


Fig. 7 Comparison of torque versus efficiency characteristics.

3. ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの試験結果

本章では、圧粉磁心のバルク体からワイヤ放電加工機を用いて製作した SR モータの試験結果について述べる。

Fig. 8 に、試作した SR モータの固定子鉄心と回転子鉄心を示す。前述したようにワイヤ放電加工は、ワイヤと対象物の間に発生する放電現象を利用した加工方法であるため、対象物が導体であることが必須である。一方、圧粉磁心は絶縁膜が施された軟磁性粉末を圧縮成形したものであり、導電率が低いという特徴を有するため、本来、ワイヤ放電加工は適さない。そのため、加工時間は通常のケイ素鋼板の数倍程度であったが、鉄心そのものには割れや欠けは生じなかった。



Fig. 8 Stator and rotor cores of SMC-based SR motor manufactured by using wire electric discharge machining.

Fig.9に、SRモータの実験システムの外観を示す。これ以降の実験による検証では、先行研究で試作した無方向性ケイ素鋼板(35A300)を適用したSRモータとの比較結果を示す。

まずFig.10およびFig.11に、トルク対速度特性および巻線電流密度対トルク特性をそれぞれ示す。Fig.10より速度特性は両材料とも解析と実験が良好に一致した。一方、Fig.11のトルク特性は、両材料とも実機の方がやや特性が悪くなった。この原因としては、後述する鉄損の増加によって入力電流が増えたことが考えられる。

続いてFig.12、Fig.13、およびFig.14には効率特性、銅損特性、および鉄損特性を示す。まずFig.12の効率を見ると、解析結果とは定量的には異なるが、定性的な傾向は似ていることがわかる。解析よりも効率が悪化した要因は、Fig.13とFig.14から明らかのように、銅損および鉄損ともに増加したためであるが、その増加率を比べると、鉄損の方が大きいことがわかる。これは冒頭でも述べたように、ワイヤ放電加工によって磁心切断面で磁粉の絶縁が破壊されて電気回路的につながり、渦電流損が増大したためであると考えられる。

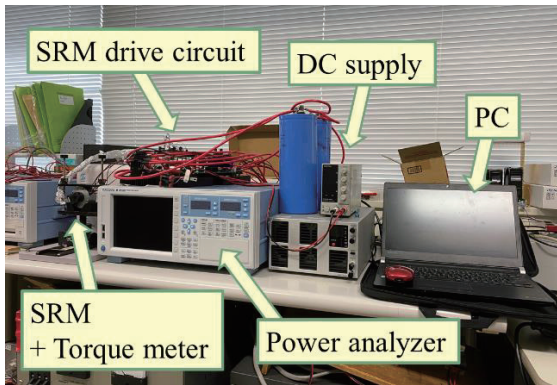


Fig. 9 Appearance of experimental system.

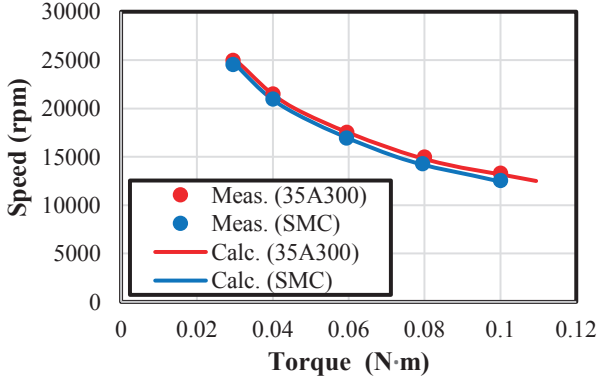


Fig. 10 Comparison of torque versus speed characteristics.

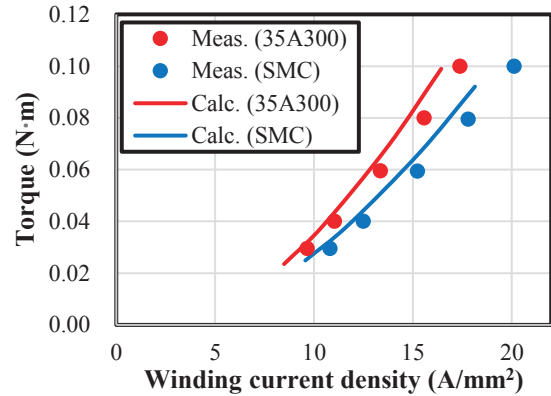


Fig. 11 Comparison of winding current density versus torque characteristics.

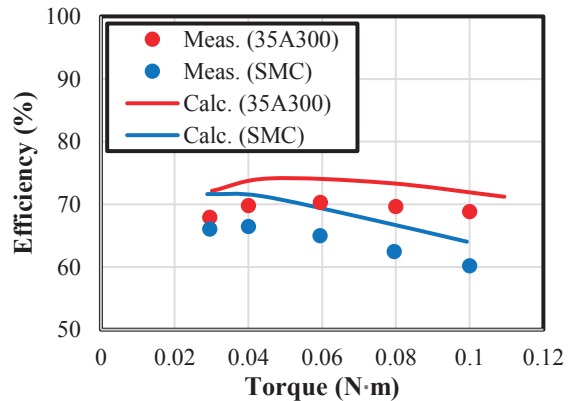


Fig. 12 Comparison of torque versus efficiency characteristics.

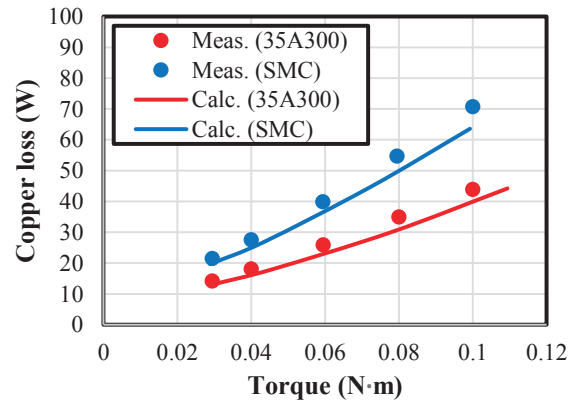


Fig. 13 Comparison of copper losses.

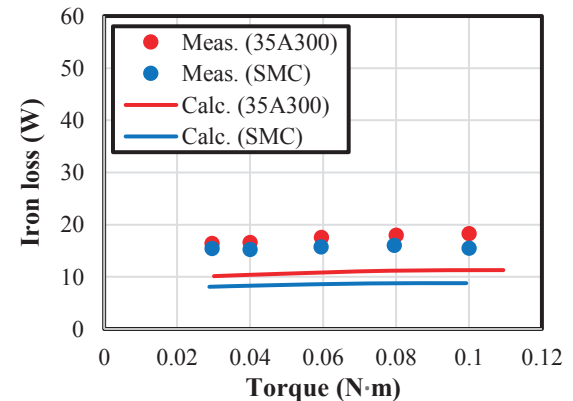


Fig. 14 Comparison of iron losses.

4. ワイヤ放電加工による磁気特性劣化の評価

4.1 ワイヤ放電加工で製作したモータ鉄心の鉄損曲線の実測

前章の実機試験により、圧粉磁心および無方向性ケイ素鋼板 (35A300) とともに、鉄損の実測値が計算値の2倍程度になることが判明した。この原因の一つとして、ワイヤ放電加工による磁気特性の劣化が想定されることから、本章では、ワイヤ放電加工による磁気特性の劣化について、実機を用いた基礎的な実験から見積もることを試みる。

Fig. 15 を用いて、実験方法について説明する。まず SR モータの回転子を U 相対向位置で固定し、その状態で U 相コイルのみに 50~1,000 Hz の正弦波電圧を印加する。そして、このときの入力電力 P_{in} から銅損を引くことで、次式のように鉄損 W_i を求める。

$$W_i = P_{in} - R_u I_u^2 \text{rms} \quad (1)$$

このような方法を用いることで、機械損や高調波の影響の無い状態で鉄損を評価することが可能になる。

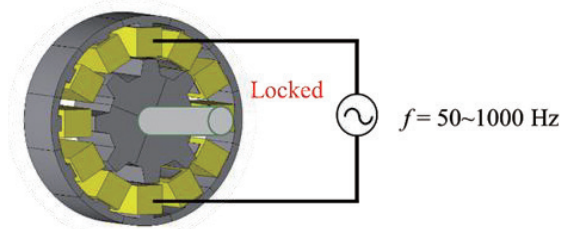


Fig. 15 Method for measuring core loss characteristics using prototype SR motor.

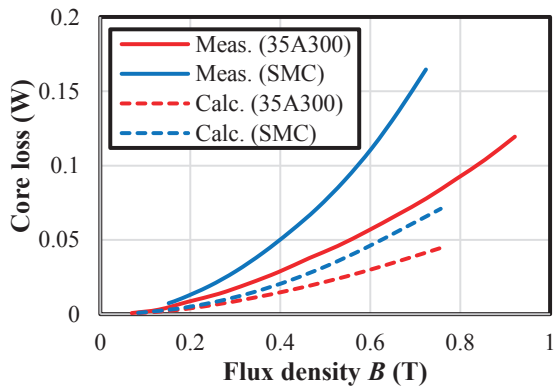


Fig. 16 Core loss characteristics ($f = 100$ Hz).

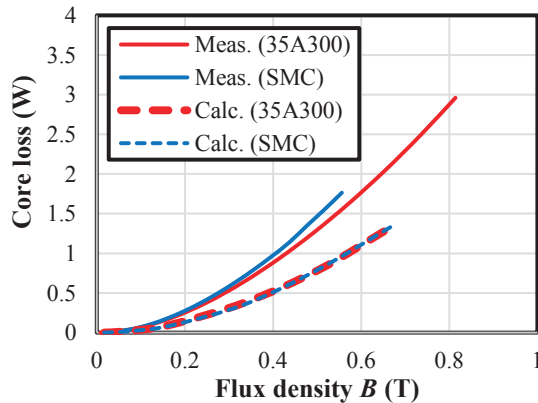


Fig. 17 Core loss characteristics ($f = 1,000$ Hz).

Fig. 16 および Fig. 17 に、上述の方法で測定した周波数 100 Hz と 1,000 Hz の鉄損曲線を示す。また比較として、3D-FEM を用いて、実験と同一条件で算定した鉄損曲線も示す。これらの図を見ると、圧粉磁心と 35A300 のどちらも損失が増加しており、ワイヤ放電加工による劣化が認められた。したがって次節では、スタインメッツの実験式で参照する材料の鉄損曲線の点列データを、Fig. 2 から本節で実測した鉄損曲線に更新して 12/8 SR モータの解析を再度実施し、ワイヤ放電加工による磁気特性劣化がどの程度モータの鉄損増加に寄与しているのかを調べる。

4.2 ワイヤ放電加工の影響を考慮した特性算定結果

Fig. 18 に、前節で実測した鉄損曲線を用いて、3D-FEM で再度解析した圧粉磁心および 35A300 を適用した SR モータの鉄損を示す。この図を見ると、鉄損の計算値がほぼ実測値と一致することが了解される。

Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21 にトルク特性、銅損特性、および効率特性を示す。前章では、いずれも計算値と実測値の間に誤差が認められたが、すべて改善し、両者は良好に一致したことがわかる。これは鉄損が適切に算定されたことで、入力電流もそれに応じて増大したためである。

以上より、ワイヤ放電加工によって材料の磁気特性が劣化したこと、またその劣化を適切に考慮することで、モータ特性を高精度に算定可能であることが明らかとなった。

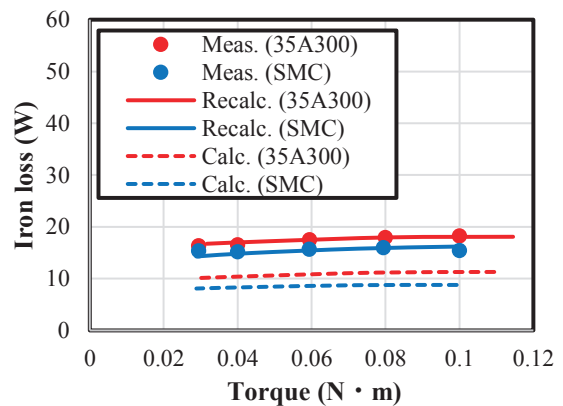


Fig. 18 Comparison of iron losses.

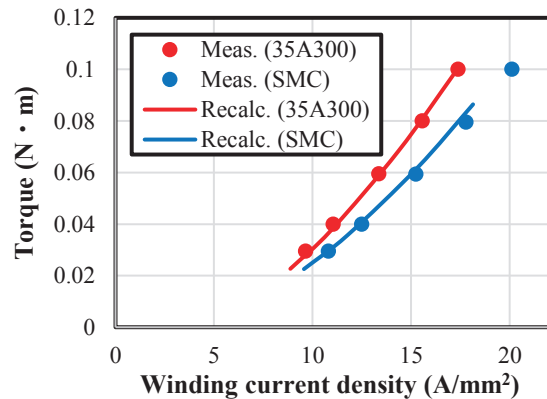


Fig. 19 Comparison of winding current density versus torque characteristics.

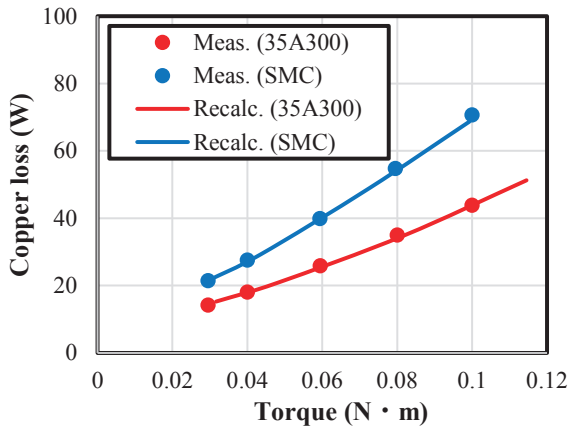


Fig. 20 Comparison of copper losses.

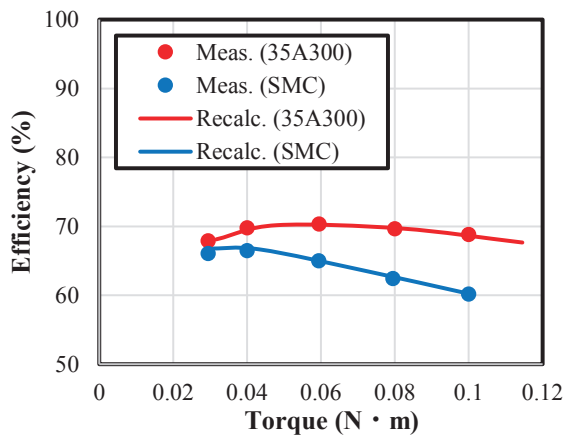


Fig. 21 Comparison of torque versus efficiency characteristics.

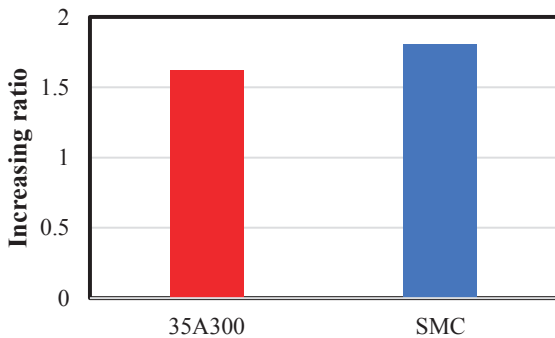


Fig. 22 Increasing ratio of iron loss.

次いで、ワイヤ放電加工による磁気特性の劣化の度合いが鉄心材料に依存するののかについても考察した。ここでは、単純に Fig. 18 に示した鉄損の増加割合について、圧粉磁心と 35A300 で比較した。Fig. 22 に、鉄損の増加率を示す。この図を見ると、両者の増加率は大略等しいことがわかる。すなわち、圧粉磁心からワイヤ放電加工によってモータ鉄心を製作しても、一般的なケイ素鋼板と同程度の劣化で収まることが明らかとなった。

5. まとめ

以上、本論文では、圧粉磁心のバルク体からワイヤ放電加工機を用いて、モータ鉄心を製作する方法の有用性について検証するため、実際に圧粉磁心 SR モータを試作し、実験と解析の両面から種々の検討を行った。

まず初めに、圧粉磁心 SR モータの固定子鉄心と回転子鉄心の試作を行った。本来、圧粉磁心は導電率が低く、ワイヤ放電加工には適さないため、加工時間は通常のケイ素鋼板の数倍程度かかったが、割れや欠けなどは生じず、モータ鉄心を製作できることを明らかにした。

次いで、ワイヤ放電加工で製作した圧粉磁心 SR モータの実機試験を行い、3D-FEM の解析結果と比較したところ、鉄損が増加することが確認された。また、この鉄損の増加は、ワイヤ放電加工が原因の一つとして考えられることから、実機を用いた基礎的な実験により、劣化の度合いを見積もるとともに、これを反映した再解析を行ったところ、モータ諸特性の計算値と実測値が精度良く一致した。

最後に、ワイヤ放電加工による鉄損増加の割合を圧粉磁心と無方向性ケイ素鋼板 (35A300) で比較したところ、両者の増加率は大略等しいことが明らかとなった。すなわち、通常のケイ素鋼板と同じように、圧粉磁心からワイヤ放電加工でモータ鉄心を製作しても、磁気特性の劣化の度合いは、一般的なケイ素鋼板と同程度であることが明らかとなった。

以上の検討により、圧粉磁心のバルク体からワイヤ放電加工機を用いて、モータ鉄心を製作する方法は有用であることが明らかとなり、特に検討初期段階における試作評価のハードルを下げることに寄与すると考えられる。

謝辞 圧粉磁心のワイヤ放電加工にご協力いただいた(株)プロスパインの操谷欽吾さま、立谷雄一さまに感謝の意を表します。

References

- 1) M. Persson, P. Jansson, A.G. Jack, and B.C. Mecrow, *7th Int. Conf. Electrical Machines and Drives*, 242-246 (1995).
- 2) Y. Enomoto, M. Ito, R. Masaki, K. Yamazaki, K. Asaka, C. Ishihara, and S. Ohiwa, *IEEJ J. Ind. Appl.*, **125**, 106-112 (2005) (in Japanese).
- 3) Y. Enomoto, H. Tokoi, K. Kobayashi, H. Amano, C. Ishihara, and K. Abe, *IEEJ J. Ind. Appl.*, **129**, 1004-1010 (2009) (in Japanese).
- 4) T. Fukuda, Y. Sasaki, and M. Morimoto, *Proc. Jpn. Ind. Appl. Soc. Conf.*, **3**, 321-326 (2008).
- 5) A. Jack, B. Mecrow, P. Dickinson, P. Jansson, and L. Hultman, *Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Conf.*, **1**, 46-50 (2000).
- 6) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **903**, 012040 (2017).

2021年9月9日受理, 2021年10月16日再受理, 2021年11月2日採録