試作ロゴスキーコイルを用いた電磁鋼板の高周波磁気特性測定

Measurement of high frequency magnetic properties of electrical steel sheet using prototype Rogowski coil

修理 雄大^{*1}(学生員), 若林 大輔^{*1}(正員), 岡 茂八郎^{*1}(正員), 榎園 正人^{*1,2}(正員)Yuta SHURI (Stu. Mem.), Daisuke WAKABAYASHI (Mem.), Mohachiro OKA (Mem.),
Masato ENOKIZONO (Mem.)

In order to develop a high-efficiency, low-loss, small, high-power, high-speed rotating motor, it is necessary to accurately measure the magnetic properties of electrical steel sheets under PWM excitation. A shunt resistor is generally used for measuring magnetic characteristics, but non-contact current measurement is required. However, iron cores are used in commercially available current measurement sensors, and it is necessary to consider the effects of core characteristics on high-frequency currents. The authors are focusing on Rogowski coils and developing small current / magnetic field sensors specialized for motor and electrical steel sheet evaluation. In this paper, we make a prototype of Rogowski coil, and report on the evaluation of basic electrical characteristics and the results of application to the measurement of magnetic characteristics of electrical steel sheets under sinusoidal excitation and PWM excitation.

Keywords: rogowski coil, current sensor, magnetic field, iron loss, magnetic characteristic measurement, electrical steel sheet.

(2019 年 9 月 6 日受付, 2020 年 9 月 28 日再受付)

1 はじめに

世界の消費電力の 50%はモータにより消費されている。またモータは今後、様々な分野で活用が期待されている。このことから、高効率・低損失且つ小型高出力・高速回転モータの開発が求められている。これらの要求と共に高速回転駆動時のモータ巻線に流れる高周波励磁電流や、それによって磁化される電磁鋼板の高周波磁気特性の正確な評価が必要となる。特に PWM 励磁下の電磁鋼板の磁気特性を測定するには、高精度な電流測定が求められる。広く使われているシャント抵抗は回路の切断や負荷の増加を考える必要がある。市販されている電流測定用センサには一般に鉄心が使用されており、高周波電流では渦電流による影響がある。そのため、鉄心の薄型化の研究も行われている[1]。磁気特性の一般的な測定では励磁コイルに流れる電流から磁界強度を求め、磁束密度との関係から鉄損を算出するため、電流振幅誤差に加え位相誤差も小さくしなければならない。

そこで、著者らはコアレスなロゴスキーコイルに着目し、モータや電磁鋼板評価に特化した小型な電流・磁界センサの開発を行っている[2]。既存市販ロゴスキ

連絡先：若林 大輔, 〒870-0397 大分県大分市一木 1727 ,
日本文理大学工学部機械電気工学科,
e-mail: wakabayashids@nibu.ac.jp

^{*1} 日本文理大学 ^{*2} ベクトル磁気特性技術研究所

ーコイルとの違いについては、ロゴスキーコイルは空芯で磁気飽和がないため数百 A 以上の大電流測定用として開発されているのが一般的である。本研究では数 A 程度の電流測定を目標とし電磁鋼板の磁気特性測定用センサとしての活用を目指しているため、ロゴスキーコイルについてコイル径や断面積、巻数などを独自に調整できるように設計試作した。本論文では、ロゴスキーコイルの基礎的な動作原理を検証するため、ロゴスキーコイルを試作しその電気特性の評価及び、応用として正弦波励磁下や空芯であるため磁気飽和及び高調波による渦電流損を無視することができる利点を活かし PWM 励磁下などの電磁鋼板の磁気特性測定に使用した結果について報告する。

2 測定原理

2.1 ロゴスキーコイルの原理

Fig.1 にロゴスキーコイルの構造を示す。空芯の環状コイルで、コイル内部に反しの線を 1 ターン巻いた構造となっている。被測定対象の電流を囲むように円環コイルを配置し、電流によって作られるアンペールの法則に従った磁界強度を検出することができる。ロゴスキーコイルに誘起される電圧 e によって電流 I は式 (1) で算出することができる[3-4]。ここで、 μ_0 は磁

$$I = -\frac{2r}{\mu_0 N a^2} \int e dt \quad (1)$$

気定数, N は巻数, a はコイルの半径, r は電流からのコイル中心までの半径である。ログスキーコイルは誘起電圧を積分することで電流を測定することができる非接触電流センサである。

2.2 検証用試作ログスキーコイル

検証用に試作したログスキーコイルの巻枠は円柱状のドーナツ形状であり, 3D プリンタにて作製した。素材は PLA (ポリ乳酸) である。今回, 製作しやすいサイズを優先したため, $r = 40 \text{ mm}$, $a = 10.25 \text{ mm}$, 導線の太さ 0.26 mm , 巻数 657 とした。リード線はより線とし, アルミシールド内にリード線を通すことで外部ノイズの低減を行った。また, ログスキーコイルでは環状コイルの中に戻りの線を通す構造になっているため, 電流方向と同じ磁束による誘起電圧を低減できる。その有無による違いを検証するために比較として同じ径と巻き数の環状ソレノイドコイルを同様に試作した。

2.3 基礎的評価

Fig.2 にログスキーコイル評価測定システムを示す。研究室に無限長の直線電流を模擬した環境を用意し試作したログスキーコイルにより電流測定を行う。信号発生器にて正弦波交流電圧を発生させ電力増幅器を通じて回路に電流を流す。回路中の交流電流を測定するために回路に接続されたシャント抵抗間 (PCYR10000B, 0.1Ω) の電圧を測定する。同時にログスキーコイルの出力電圧を 12 bit, 20 MS/s の A/D コンバータを介しパソコンに取り込み, 式 (1) から電流を算出した。ノイズ除去のため 16 周期の加算平均化を行っている。

$$I_{pro} = I_{ori} \frac{I_{SR}}{I_{RC}} \quad (2)$$

今回の試作コイルでは作り易さを優先したため, a は r よりも十分に小さい条件となっていないため, ログスキーコイルと環状ソレノイドコイルは 50 Hz においてシャント抵抗から得られる電流の振幅に合うよう式 (2) で校正した。ここで, I_{pro} は校正後の電流, I_{ori} は校正前の電流, I_{SR} と I_{RC} はそれぞれ 50 Hz 時のシャント抵抗とログスキーコイルの電流の最大値である。

試作ログスキーコイルの基礎的評価として以下の検討を行った。シャント抵抗から得られる電流を基準とした。

Fig. 1 Rogowski coil.

Fig. 2 Measurement system for Rogowski coil.

- ・ログスキーコイルと電流の位置 (Fig.3)
- ・ログスキーコイルと電流との角度 (Fig.5)
- ・試作コイルにおいて測定対象の電流に対して直交する電流を流した場合の影響 (Fig.7)
- ・周波数に対する振幅誤差率, 位相差

Fig.4 にログスキーコイルと電流の位置に対する振幅の変化率を示す。コイル中心の電流を基準とし上下左右 25 mm 移動させ, 電流振幅の変化をみた。結果より, 中心から離れるにつれ振幅の値は変化するものの変化率 0.5 %程度以内であることが分かる。

Fig.6 はログスキーコイルと電流との間の角度 θ を変化させたときの振幅の変化率を示す。 $\theta = 0^\circ$ のときはコイルと電流の角度が直角の関係である。角度を変えると振幅値は変化するものの変化率 0.6 %程度であった。今回試作したログスキーコイルは電流の位置や傾きによっては最大 1 %程度の誤差が生じることが分かった。

Fig.8 は測定対象の電流に対して直交する電流を流した場合の試作ログスキーコイルと環状ソレノイドコイルが受ける影響を示す (なお, 測定対象及び直交する電流は校正時に用いた 50 Hz の電流である)。結果より, ログスキーコイルは誤差 0.05 %程度, 環状ソレノイドコイルは 1.5 %であるため, 環状ソレノイドコイルは直交電流による影響を受けやすいことが分かった。

最後に周波数に対する振幅誤差率と位相差につい

Fig. 3 Change in current position.

Fig. 5 Change in current angle.

Fig. 4 Rate of change by current position.

Fig. 6 Rate of change with current angle.

て示す。電流位置はコイルの中心とし、 $\theta = 0^\circ$ としたときの 50 Hz から 10 kHz の測定を行った。シャント抵抗から得られる電流を基準とし、試作したログスキーコイル、環状ソレノイドコイルから得られる電流、参考に市販の電流プローブ (HIOKI 9278 : AC/DC ゼロフラックス方式 (フラックスゲート検出型)) から得られる電流を比較した。これらの関係を詳細に分析した結果を Fig.9 に示す。Fig.9(a)は周波数に対する振幅誤差率を示す。周波数の増加に伴い、振幅誤差率は増加しているが、試作したログスキーコイルは 10 kHz 以内で 0.4 % 以下となった。Fig.9(b)は周波数に対する位相差を示す。周波数の増加に伴い、位相差は増加しており 10 kHz 以下では位相差 0.4° 以下となった。今回、検証用に試作したログスキーコイルを用いた電流の位置や角度、周波数に対して変化する振幅誤差率、位相差は小さいことが分かった。また、試作したログスキーコイルは市販の電流センサと同程度の周波数特性を有することが分かった。

Fig. 7 Orthogonal current.

Fig. 8 Effects of orthogonal currents.

3 磁気特性測定

3.1 リングコア試料

ログスキーコイル, 環状ソレノイドコイル, 市販の電流センサ, シャント抵抗の 4 つの電流センサを用いて磁気特性測定を行った結果を報告する。使用した試料は, 0.35 mm 厚の電磁鋼板を積層させたリング試料である。リングコアの寸法は, 外径 60 mm, 内径 50 mm, 積厚 5 mm である。これらのリングコアは, 電磁鋼板を接着積層したものをワイヤ放電加工で切り出したものである。励磁巻線は, 直径 0.8 mm のホルマル線を 166 回巻いている。また, サーチコイルは直径 0.32 mm のホルマル線を 1 回巻いている。

リングコア試料の鉄損 W_i を以下の方法で算出した。サーチコイルの電圧 v_s と式 (3) より励磁磁束密度を求め, シャント抵抗を流れる励磁電流 I_{ex} を各センサからの電圧から算出し, 有効磁路長 L_e と式 (4) を用いて励磁磁界強度 H_{ex} を求める。この B_{ex} と H_{ex} 及び, 式 (5) を用いて鉄損 W_i を算出する。なお, N_s はサーチコイルの巻き数, S はサーチコイルの断面積, N_e は励磁コイルの巻き数である。また, ρ はコア材の密度, T は励磁電流の周期である。

$$B_{ex} = -\frac{1}{N_s S} \int v_s dt \quad (3)$$

$$H_{ex} = \frac{N_e I_{ex}}{L_e} \quad (4)$$

$$W_i = \frac{1}{\rho T} \int_T H_{ex} \cdot \frac{dB_{ex}}{dt} dt \quad (5)$$

3.2 正弦波励磁下

リングコア試料を正弦波励磁下で評価するための磁気特性評価システムを Fig.10 に示す[5]。 v_s はコンピュータで取得し, 各センサからの電圧は 12 bit, 20 MS/s の A/D コンバータで取り込む。励磁磁束密度 B_{ex} は, D/A コンバータと高速パワーアンプを用いて生成し B_{ex} の最大値 B_{exmax} を 0.8 T と設定し, 励磁周波数 f_{ex} を 50~2 kHz まで変化させた。なお, この際, A/D コンバータのサンプリング周波数は, 1 MHz とし, 5 kHz 成分まで考慮した。さらに, 測定値として 16 周期分を同期加算平均した値を用いた。

Fig.11 に 2 kHz 時の測定結果を示す。Fig.11(a)は正弦波に制御された励磁磁束密度波形を示す。Fig.11(b)に各センサから得られた励磁磁界強度波形を示す。各センサの電流波形は同様の傾向であるが, 拡大するとログスキーコイルの値が基準となるシャント抵抗と最も近い値であった。Fig.11(c)は各センサから得られたヒステリシスループを示す。励磁磁界強度波形同様に拡大するとログスキーコイルの値が基準となるシャント抵抗と最も近い値である。各センサの周波数毎の鉄損を Fig.12 に, 2 kHz 時の鉄損値とシャント抵抗を基準とした場合の誤差率を Table 1 に示す。各センサであまり差はみられないが, 2 kHz 時にはログスキーコイルの誤差率が約 0.8 % と最も低く, 環状ソレノイドコイルが約 4 % と最も大きい結果となった。

3.3 PWM 励磁下

リングコア試料を PWM 励磁下で評価するための磁気特性評価システムを Fig.13 に示す。先の正弦波励磁下での評価システムの高速パワーアンプ部を PWM インバータ(MWINV1R022)に置換したものである[6]。正弦波励磁下同様 v_s はコンピュータ A で取得し, 各センサからの電圧は 12 bit, 20 MS/s の A/D コンバータで取り込む。更に, 変調波の周波数 f_m , キャリアの周波数

(a) Amplitude error rate based on shunt resistance.

(b) Phase difference based on shunt resistance.

Fig. 9 Frequency characteristic.

f_c , 変調率 m は, コンピュータ B を用いて設定する。励磁磁束密度 B_{ex} は, D/A コンバータと高速パワーアンプを用いて生成し B_{ex} の最大値 B_{exmax} を設定した。なお, この際, A/D コンバータのサンプリング周波数は, 20MHz とし, 10MHz 成分まで考慮した。更に, 測定値として 32 周期分を同期加算平均した値を用いた。

f_m を 50 Hz, f_c を 2 kHz, m を 0.4, B_{exmax} を 0.8 T に設定した場合の測定結果を Fig.14~19, Table2 に示す。

Fig.14(a)は制御された磁束密度波形を示す。(b),(c),(d)はそれぞれシャント抵抗を比較としたログスキーコイル, 環状ソレノイドコイル, 市販の電流センサから得られた磁界強度波形を示す。市販の電流センサはノイズを多く含んでいるが, ログスキーコイルと環状ソレノイドコイルは基準となるシャント抵抗と同様な波形となっている。Fig.15(a),(b),(c)はシャント抵抗を比較としたログスキーコイル, 環状ソレノイドコイル, 市販の電流センサのヒステリシスループを示す。市販の電流センサはノイズの影響により, そのループ形状が不明確となっているが, ログスキーコイルと環状ソレノイドコイルは基準となるシャント抵抗と同様の結果となっている。Fig.16 は Fig.15(a),(b)のマイナーループを拡大したものを示す。どちらもシャント抵抗と同様な形状となっている。Table 2 に各センサから算出された鉄損値とシャント抵抗を基準とした誤差率を示す。ログスキーコイルがシャント抵抗と最も近い値を示し, 1.3 %程度であった。Fig.17 に各センサから得られた H_{ex} の FFT 解析を行った高調波成分を示す。ログスキーコイルの 50,150,250 Hz 成分はシャント抵抗と比較する

Fig. 10 Sinusoidal excitation measurement system.

(a) Excitation magnetic flux density B_{ex} .

(b) Excitation magnetic field strength H_{ex} .

(c) B-H curve

Fig. 11 Measurement results under sinusoidal excitation. ($f_m = 2\text{kHz}$, $B_{exmax} = 0.8\text{T}$)

Fig. 12 $W_i - f_m$. ($f_m = 50 \sim 2\text{kHz}$, $B_{exmax} = 0.8$)

Table 1 Iron loss under sinusoidal excitation. ($f_m = 2\text{kHz}$)

Sensor	Iron loss[W/kg]	Error rate[%]
Rogowski coil	177.6	0.755
Solenoid coil	183.6	4.153
Current sensor	178.6	1.322
Shunt resistor	176.3

Fig. 13 PWM excitation measurement system.

Fig. 14 Measurement results of B_{ex} and H_{ex} .($f_m = 50\text{Hz}$, $f_c = 2\text{kHz}$, $m = 0.4$, $B_{exmax} = 0.8\text{T}$)

と誤差率 6% 以下であったが、350, 450, 550 Hz では 20% 程度、また、4k, 8k, 12 kHz 付近では 2% 程度となった。Fig. 18 は各センサの各周波数帯域で生じる磁界強度の総和を示す。市販センサでは高調波成分を多く含むことが分かる。Fig. 19 は Fig. 18 を基にシャント抵抗を基準として各センサの誤差率を示す。PWM 励磁のように高調波を多く含む場合、ログスキーコイルは 100 kHz 以上の高調波の誤差率を抑えることができていていることが分かる。

(a) B - H curve of Rogowski coil. (b) B - H curve of Solenoid coil. (c) B - H curve of Current sensor.Fig. 15 Measurement results of B - H curve.
($f_m = 50\text{Hz}$, $f_c = 2\text{kHz}$, $m = 0.4$, $B_{exmax} = 0.8\text{T}$)

(a) Rogowski coil. (b) Solenoid coil

Fig. 16 Enlarged view of Fig. 15.

Table 2 Iron loss under PWM excitation.

Sensor	Iron loss[W/kg]	Error rate[%]
Rogowski coil	1.774	1.277
Solenoid coil	1.785	1.889
Current sensor	1.787	1.992
Shunt resistor	1.752

Fig. 17 Frequency component of each sensor.

Fig. 18 Total magnetic field strength generated in the frequency band.

Fig. 19 Error rate in Fig.18 based on shunt resistance.

4 まとめ

本論文では、高調波・PWM 励磁下の電磁鋼板の正確な磁気特性測定を目的として、ログスキーコイルを試作し、シャント抵抗を基準として環状ソレノイドコイルと市販の電流センサと比較を行った。高周波正弦波励磁、PWM 励磁の両方において、試作したログスキーコイルがシャント抵抗の磁界波形及び鉄損と最も近い値を示した。よって、PWM 励磁下においてログスキーコイルの有効性について確認することができた。今後は、電流位置や角度に影響を受けないログスキーコイルの小型化や様々な PWM 励磁条件での測定により詳細な検証を行う予定である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 17H01259(基盤研究(A))の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 田中凌将, 上野稜也, 三枝香風, 加治淳一, 山下昂洋, 柳井武志, 中野正基, 福永博俊, 無電解めっき法により作製した Fe-Ni 膜, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-19-096, pp. 21-24, 2019.
- [2] 修理雄大, 若林大輔, 榎園正人, コアレス電流・磁界センサ開発に向けたログスキーコイルの基礎的評価, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-19-038, pp. 21-24, 2019.
- [3] 林泉, 中野義映, 「ログスキーコイルと磁気探針」, 電気学会雑誌, Vol. 81, No. 874, pp. 1084-1092, 1961.
- [4] 鈴木洋一郎, 河野秀一, 片岡良平, 木村友則, 桑野博喜: 「積層基板構造による小型広帯域コイルの検討」, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.828 pp.1-8 (2015)
- [5] 岡茂八郎, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正, 極薄電磁鋼板製ステータコアの鉄損評価のための各種励磁法の検討, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-17-182, pp. 13-16, 2017.
- [6] 岡茂八郎, 榎園正人, 清武博文, PWM インバータ励磁下の電磁鋼板製リングコアの鉄損測定法の検討, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-19-038, pp. 1-4, 2019.