方向性電磁鋼板を用いた螺旋コア

正員 開道 力 (新日本製鐵)

Spiral Core made of Grain-oriented Electrical Steel Sheet

Chikara Kaido, Member (Nippon Steel Co.)

As a high performance motor core, spiral cores made of grain-oriented electrical steel sheets (GO) were developed. All the teeth directions are coincident with the GO rolling directions (easy magnetization axis) in the spiral cores. The GO spiral cores have excellent properties, because the GO has a very low iron loss and a very high permeability in the rolling direction. In the GO spiral cores, the iron losses decrease to a quarter and the inductions are 0.2 T higher at 800 A/m compared with conventional spiral cores usually of SPCC. The thickness of conventional spiral cores generally changes, and the applications are limited to automobile alternator cores. The thickness of GO spiral core scarcely changes during a spiral deformation, because the core sheets are deformed in the transverse direction to the rolling direction of GO, that is $\langle 110 \rangle \{011\}$, and the $\langle 110 \rangle \{011\}$ deformation of Fe does not bring about the sheet thickness. As the stiffness and the packing factor of a GO spiral core are high in the sake of no thickness change, GO spiral cores have high performance for motor cores.

キーワード：方向性電磁鋼板、螺旋コア、磁気回路、鉄損、磁束密度

1. 緒言

最近、電気自動車や工業用自動化機器等から家電機器までの、あらゆるモータ等の回転機において、小形軽量化、高効率化の要求が高い。回転機の小形高出力化の為に、永久磁石の高級化や導線占積率向上がなされ、コア素材に対しては高磁束密度化が要求されている。また、高効率化の為に、高性能永久磁石や高磁束密度（高透磁率）のコア素材を用いることにより、励磁電流を低減（銅損低減）させるとともに、コア素材では鉄損を低減させることが重要である。このようなコア素材への要求に対して、主なコア素材である電磁鋼板は、鋼板の高純度化や集合組織の改善により、高磁束密度化（高透磁率化）や低鉄損化が行われてきた。

一方、実用化を考えると、モータ等の回転機の価格を低くすることも重要である。そのため、回転機の製造コストの削減のために、回転機生産設備の自動化、省工程が重要であり、また材料費削減の為に、電磁鋼板等のコア素材のスクラップ低減が必要である。例えば、自動車の交流発電機では、螺旋コアが使用され、生産ラインの自動化、またコア素材のスクラップ低減がなされている。

このような背景のもとに、回転機コアの高磁束密度化、低鉄損化の為に、主要な従来コア材である無方向性電磁鋼板 (Non-oriented electrical steel sheet: NO) より、

極めて、高透磁率、低鉄損である方向性電磁鋼板 (Grain-oriented electrical steel sheet: GO) の磁化容易方向を、コア性能を決定するコア磁路部に用いること等が検討されている。スクラップ低減のために、分割コア¹⁾、ディスクコア（巻きコア）²⁾や、螺旋コア (Spiral core) の検討が加えられている。螺旋コアは、従来 SPCC 材（磁気特性的には無方向性）を用いて、自動車の交流発電機（オルタネータ）に使用されている。しかし、螺旋加工により板厚が変化し、コアに占める電磁鋼板の比率（占積率）が低くなるため、コア磁気特性や機械的剛性が劣化する。従って、螺旋コアは板厚変化が小さい範囲に限られ、コアの外周部（以後コアバックと呼ぶ。図1参照）の幅が狭いもののしか、応用されていない。

今回、螺旋加工でコア板厚が殆ど変化せず、かつ設計磁束密度を高く取れる螺旋コアとして、方向性電磁鋼板を用いた、コアの歯の方向がすべて材料の磁化容易方向 $\langle 100 \rangle$ の圧延方向（L方向）である方向性電磁鋼板螺旋コア（以下、GO螺旋コアと表示）を検討した。

2. 方向性電磁鋼板を用いた螺旋コアの概要

方向性電磁鋼板 (GO) の磁化容易方向を活用したGO螺旋コアの概念図を図1に示す。GOは図2のように、圧延方向が磁化容易方向 $\langle 100 \rangle$ であり、このL方向の素

材特性は、図3、図4のように、磁化特性および鉄損特性が、従来の主な回転機コア素材に使用される無方向性電磁鋼板 (NO) より優れている。

GO螺旋コアは、このGOのL方向特性を活用するもので、図2のように、加工前のコア片をGO素材より歯の方向がL方向になるように切り出す。その後、図1のように螺旋巻き加工を行うと、歯が常に磁化容易方向<100>である回転機コアができる。このGO螺旋コアは、歯の磁気特性が非常に優れているので、歯の特性が重要視される多極回転機において、コア特性の改善効果大きい。

図1 GO螺旋コア
Fig.1. GO spiral core.

図2 GOと螺旋加工前コア片
Fig.2. GO and core pieces before spiral deformation.

図3 電磁鋼板素材のDC磁化特性
Fig.3. DC magnetizing curves of electrical steel sheets.

図4 電磁鋼板素材の鉄損特性
Fig.4. Iron losses of electrical steel sheets at 50Hz.

実際に、製作したGO螺旋コア (焼鈍後) を写真1に示す。写真において、黒い部分が、方向性電磁鋼板GOの被膜 (S_2 被膜³⁾) であり、螺旋加工により塑性変形している部分が白い部分 (塑性変形により、被膜剥離した部分) である。

図5 GO螺旋コアの写真 (焼鈍後)
Fig.5. Photographs of GO spiral cores.

3. GO螺旋コアの磁気回路特性

GO螺旋コアの磁気回路特性を、コアバック部と歯部に分けて考える。

歯部は、GOのL方向 (結晶方位<100>) に対応する。この部分は、前述のように、螺旋加工によって塑性変形しないので、GOのL方向の優れた磁気特性がそのまま反映される。従って、従来の無方向性電磁鋼板 (NO) の場合より、磁化特性、鉄損特性ともに非常に良い。(図3、図4参照)

一方、コアバック部は、磁束の流れる円周方向がGOのC方向 (結晶方位<011>) に対応する。この部分は図1のように、螺旋加工により塑性変形するので、コアバック部の磁気特性はGOのC方向の素材特性とは異なり、塑性変形したGOのC方向の特性となる。そこで、図1と同

じように、螺旋加工した歯がない円筒螺旋コア（円周方向：C方向）を試作して、通常の磁気測定を行うリング試料（内径 $D_i=71\text{mm}$ 、 $D_o=91\text{mm}$ ）として磁気特性を測定をし、等価的にコアバック部の磁気特性を評価した。使用した電磁鋼板は板厚 0.5mm 、 $3\%\text{Si}$ のGOで、比較材は板厚 0.5mm 、 $0.5\%\text{Si}$ のNO（50A1000⁽⁴⁾）である。磁化特性と鉄損の測定結果を図6、図7に示す。GO螺旋コアの場合、磁化特性は高磁界でNO螺旋コアより少し劣るが、全体的には同じ程度である。鉄損はGO螺旋コアの方がNOコアより低い。円筒型GO螺旋コアの磁気特性は、焼鈍すれば素材のC方向特性（図3、図4）と同程度の値を示している。このように、GO螺旋コアにおけるコアバック部の特性は、NOと比べて、同レベルである。

図6 円筒螺旋コア（円周方向：C方向）の磁化特性

Fig.6. Magnetizing force at cylindrical core

図7 円筒螺旋コア（円周方向：C方向）の鉄損特性

Fig.7. Core loss at cylindrical core

次に、GO [歯 1.8T 、コアバック 1.35T 設計]とNO [歯、コアバックとも 1.5T 設計、焼鈍（ 750°C 、2時間）あり]について、歯付き螺旋コアの励磁電流とコア鉄損を計算した。歯とコアバックの磁束密度に対応した磁界と鉄損を、歯部の特性は図3、図4より、コアバック部の特性は図6、図7より求め、それぞれの磁路長より全励磁電流と全鉄損を計算した。その結果を図8に示す。縦

軸は焼鈍後のNO螺旋コアにおける励磁電流や鉄損に対するGO螺旋の励磁電流や鉄損の比率 K であり、横軸は、

$$A = \frac{D_c}{N_p \ell_T} \quad (1)$$

であり、 A は1極あたりのコアバック部磁路と歯の長さの比率に比例する定数である。ここで、図1に示されるように、 N_p は極数、 D_c はコアバック部の平均直径、 ℓ_T は歯の長さである。

GO螺旋コアの励磁電流は、焼鈍（ 800°C 、2時間）後であれば、全ての A に対して、焼鈍後のNO螺旋コアよりも低いことが分かる。GO螺旋コアが螺旋加工のまま（無焼鈍）の場合には、焼鈍後のNO螺旋コアに比べて、 $A > 0.2$ で、励磁電流は大きい。GO螺旋コアの鉄損は、焼鈍前後とも、また A 値に関わらずNO螺旋コアに比べ低い。特に、多極コアのように、 A が小さい場合には、GO螺旋コアが優位であることが明かである。

図8 歯付螺旋コアの励磁電流、鉄損におけるGO/NOの比（理論計算）

Fig.8. Percentages of exciting current and core loss of GO to those of NO in spiral cores with teeth. (theoretically calculated.)

螺旋コアを、実際の交流発電機（12極）の寸法で試作し、焼鈍後の励磁特性を評価した。コア磁気回路特性のみを比較するため、螺旋コアと励磁フレーム（回転子/界磁側に相当。フレーム材質はNO）を密着させて、即ち空隙なしの固定子と回転子のような状態で、直流の励磁特性を測定した。磁束密度は、歯部に探索巻線を巻き測定した。磁界は、単純に螺旋コアの磁路長で計算した。歯の方向が $<100>$ 方向のGOと、従来材（NO）の結果（磁束密度が最も高い歯で測定）を図9、図10に示す。

GO螺旋コアの保磁力は、従来のNO螺旋コアの保磁力の $1/3 \sim 1/5$ に減少した。保磁力は鉄損うちヒステリシス損にほぼ比例するので、ヒステリシス損も $1/3 \sim 1/5$ になる。[鉄損のうち渦電流損は、一般に電気抵抗と

板厚で決定されるので、螺旋加工しても渦電流損はあまり変化しない。] GO螺旋コアの磁束密度は、従来NO螺旋より、1000~2000A/mにおける磁束密度で、0.15~0.2T程、向上している。

実際の回転機では、空隙の影響が大きく、空隙を励磁する励磁電流の方がコアを励磁する電流より大きい。そこで、空隙約0.3mmで、同様な実験を行い、同じ励磁電流で比較したところ、励磁特性の傾きが空隙の影響により小さくなった為、保磁力は正確に測定できなかったが、GO螺旋コアと従来NO螺旋コアを磁束密度、保磁力について比較すると、ほぼ同様の結果がった。

図9 GO螺旋コアの励磁特性
Fig.9. Exciting force of GO spiral core.

図10 従来螺旋コアの励磁特性
Fig.10. Exciting force of conventional spiral core.

4. 螺旋加工後の形状と形状限界

螺旋コアを、円周方向に応力が加わらないように螺旋加工した結果、NOの板厚は螺旋コアの外径で薄く、内径で厚くなったが、歯の方向が<100>であるGO螺旋コアの場合では板厚の変化が殆ど見られなかった。この理由は次の通りである。GO螺旋コアではコアバック部が塑性変形し、その変形はGOのC方向になる。ここで、引っ張り塑性変形における板厚 t の変化と板幅 W の変化の比は、変形前の板厚、板幅を t_0 、 W_0 、変形後の板厚、板幅を t_1 、 W_1 として

$$r \text{ 値} = \frac{\log (W_0 / W_1)}{\log (t_0 / t_1)} \quad (2)$$

で表現される r 値⁵⁾で示され、GOのC方向[<100> {011} の90° 方向]の r 値は、図11より無限大であるので、板厚は変化しないことが分かる。[GOは板面が{011}、L方向が<100>である。]即ち、GOのC方向の引っ張り塑性変形では、材料内の変形滑り方向が<111>で、鋼板面{110}内にある為、板厚は変形しない。

このように、GO螺旋コアは、板厚が変化しないので、GO螺旋コアではコアの占積率は、従来の打ち抜きコアと同じ程度になる。従来の無方向性電磁鋼板(NO)等による螺旋コアでは、 r 値が1.5~2程度であり、コア材の板厚が変化するので、占積率が低下し、回転機の出力も低下する。また、占積率低下により、機械的剛性も低下するため、回転機の振動や騒音の原因にもなる。GO螺旋コアでは、このような出力低下や騒音振動の問題は生じない。

図11 鉄の単結晶での r 値⁵⁾
Fig.11. r -values in Fe single crystal

螺旋コアのコアバック部板幅は、螺旋加工前の板幅と比較して、GO、NOとも殆ど変化なかった。これは、螺旋加工の場合、図12のように引っ張り加工と圧縮加工が同時に行われるためである。即ち、図中のa部は円周方向に延びるため幅方向は縮むが、b部は円周方向に圧縮されるため、幅方向は広がるので、この両部が打ち消し合って、板幅は変化しない。

しかし、コアバック部板幅は変化しないが、コアバック部の形状は、図13のように変形する。GO螺旋コアの場合は、コアバックのスロット隣接部形状の変形量 Δr_i 、 Δr_c 、 Δr_o が次の式(3)で表せる。この変形は、NO螺旋コアでは約半分になるが、同じ問題が生じる。しかし、螺旋コアの最外径は変化しないので、実用上問題ないと推定する。

$$\Delta r_i, \Delta r_c, \Delta r_o \approx \frac{W^2}{8R} \quad (3)$$

螺旋コアの形状を実際にマイクロメーターやノギスを using して測定してみた。コアの外径80mm、内径60mm、

外内径比1.33のGO螺旋コアの場合、コアの板厚変化は板厚0.5mmに対し、マイクロメーターで5 μ m以下であった。(板厚0.5mmのNO螺旋コアでは40 μ m板厚が変化した。) 一方、板幅変化は、GO、NO共に、幅9.85mmに対して、ノギス測定で50 μ m以下であった。このように、GO螺旋コアでは、コアバック部で多少の変形(歪み)はあるが、板厚、板幅の変化は殆ど確認されなかった。

図12 螺旋加工によるメタルフロー
Fig.12. Metal flow in spiral deformation.

図13 コアバック部変形
Fig.13. Deformation at coreback.

GO螺旋コアの形状限界を、円筒型コア(外径 D_o 、内径 D_i)の場合で検討する。機械的な伸び(elongation)を ε とし、圧縮変形の限界を伸び ε と等しいものと仮定すると、螺旋加工可能な範囲は、

$$\frac{D_o}{D_i} < \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} \quad (4)$$

となる。ここで、GOのC方向の伸び ε は、表1より30~34%で、NOと同程度であり、 $\varepsilon \approx 0.3$ とすると、

次の式(5)となり、殆ど、全ての回転機コア($D_o/D_i < 1.5$)に対応できることが分かる。

$$\frac{D_o}{D_i} < 1.86 \quad (5)$$

一般な回転機の場合には、 $D_o/D_i < 1.5$ であり、 ε が0.2以上であればGOの螺旋加工は可能であることがわかる。

コアの幅 $W_{av} = (D_o - D_i) / 2$ に対して、螺旋加工可能な平均直径 $D = (D_o + D_i) / 2$ は、

$$D > \frac{W_{av}}{\varepsilon} \quad (6)$$

となる。

一方、歯付き螺旋コア(歯の幅 W_T 、数 N_T)では、概算的に

$$D > \frac{W}{\varepsilon} + \frac{N_T W_T}{\pi} \quad (7)$$

で、GO螺旋コアの限界が表せる。

表1 代表的な方向性電磁鋼板(3%Si)の伸び³⁾
Table 1. Elongation of grain-oriented electrical steel sheets(3%Si).

種 類		伸び (%)		占積率 (%)
記 号	板厚(mm)	L	C	
G (オリエントア)	0.23	5	34	98.0
	0.27	8	30	98.5
	0.30	10	33	98.7
	0.35	12	32	98.7
P (オリエントア・ハイテ)	0.23	5	30	97.7
	0.27	9	33	98.1
	0.30	8	34	98.3
	0.35	15	33	98.5
<参考>	35A250	19	21	98.0
	50A470	32	34	98.5
	50A1000	34	34	98.5
	50A1300	35	35	98.5

GO螺旋コアにおける問題として、図2で明らかなように、GOのC方向(コアの円周方向に対応)の長さが、電磁鋼板(板厚 t)の電磁鋼板幅 W_{ss} で限定されることである。電磁鋼板幅で対応できるGO螺旋コアは、コアバック部の平均直径 D 、コア厚さ H とすると、

$$DH < \frac{t W_{ss}}{\pi} \quad (8)$$

である。 $t = 0.5$ mm、 $W_{ss} = 1000$ mmでは、

$$DH < 160 \text{ mm}^2 \quad (9)$$

となり、小形回転機にしか適用できない。対策として、GOのC方向スリット片を溶接して、長い素材をつくり、螺旋コアをつくるか、或いは1巻(1枚)の螺旋コアをつくり、打ち抜きコアと同じように、積層する等が考えられる。この1巻(1枚)の螺旋コア場合、

$$D < \frac{W_{ss}}{\pi} \quad (10)$$

であり、 $W_{ss} = 1000\text{mm}$ では、

$$D < 318\text{mm} \quad (11)$$

となり、ある程度大きい螺旋コアが可能である。当然、分割コアにすれば、さらに大きい螺旋コアができる。

5. 結言

方向性電磁鋼板(GO)の圧延方向(L方向)、即ち磁化容易方向<100>を歯の方向に揃えたGO螺旋コアを試作し、評価した。

GO螺旋コアでの鉄損は、無方向性電磁鋼板(NO)の50A1000の場合と比較し、歯部では1/10以下に激減でき、鉄損が高いコアバック部でも、50A1000より低い。従って、GO螺旋コア全体では50A1000より1/3以下に低減できる。(SPCCと比較すればさらに改善率は大きい。) また、GOのL方向の磁束密度では、800A/mで1.9T以上で、無方向性電磁鋼板の1.6T以下に比べてかなり高いので、GO螺旋コアの使用条件によっては、かなりのコア磁束の増加、すなわち回転機の高出力、小形軽量化が期待できる。

このように、GO螺旋コアは歯部に、磁気特性が極めて優れているGOのL方向特性を活用するものなので、コアの磁気回路特性は、多極コアのように、コアバック部/歯部の磁路長比が小さいほど大きく改善される。従って、回転機の機種としては、2極や4極が主流である誘導機より、8極以上のブラシレスDCモータ等に適している。

また、このGO螺旋コアは、無方向性電磁鋼板を用いた従来の螺旋コアと異なり、螺旋加工による板厚変化がないので、占積率や剛性等の低減はない。さらに、従来の螺旋コアと同様に、電磁鋼板のスクラップの低減も図2のように可能であり、回転機コアのコスト削減にもつながり、また回転機生産ラインの自動化も容易にできる。

以上のように、GO螺旋コアの優位性が確認された。しかし、実用化のためには、螺旋加工後の歪取り焼鈍などの問題もある。中形機以上(コア励磁磁界が5000 A/mより低い場合)では、歪取り焼鈍することにより特性が改善されるが、小型機(5000 A/m以上で使用)の場合は不要であると考えられる。被膜剥離や打ち抜きの問題も、従来のNO皮膜塗布(有機/半有機系皮膜、L被膜³⁾等)等をすれば解消されると思われる。

このGO螺旋コアの用途としては、小形軽量化、高効率化が重要である分野が考えられる。例えば、電気自動車の駆動モータをはじめ、工場等の省力化ロボットに使用される高性能サーボモータ、さらには一般の高性能サーボモータが考えられる。

最後に、この研究を行うにあたり、有益な御指導、御助言して頂きました九州工業大学山崎二郎教授に深く感謝します。螺旋加工における塑性変形について討議して頂いた当社鉄鋼研究所鋼材第一研究部利用技術グループに感謝します。

(平成 7年 6月27日受付, 平成 7年 8月30日再受付)

文 献

- (1) 開道: 電気学会研究会資料RM-94-59 (1994)
- (2) 渡辺他: H5年電気学会全国大会NO. 811
- (3) 新日鐵: 「新日鐵の電磁鋼板」Cat. No. SC501
- (4) 日本工業規格: 無方向性電磁鋼帯JIS C 2552-1988
- (5) 薄鋼板成形技術研究会(吉田監修): プレス成形難易ハンドブック(日刊工業新聞社, 昭和62) P443

開道 力 (正員) 1950年 9月 7日生まれ。48年九州工業大学電子工学科卒業。50年 3月東京工業大学電子物理学専攻修士課程修了。同年新日本製鐵(株)入社。主として、電磁鋼板をはじめとする磁性材料の磁気応用、磁気物性及び磁気計測等の研究に従事。現在、同社、鉄鋼研究所主幹研究員。