

回転中の誘導モータにおける固定子鉄心の 磁気特性分布の直接測定*

Direct Measurement of Local Magnetic Properties in Stator Core of Rotating Induction Motor



千田 邦浩
Kunihiko Senda
技術研究所
電磁鋼板研究部門
主任研究員(主席掛長)



石田 昌義
Masayoshi Ishida
技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(課長)・理博



本田 厚人
Atsuhito Honda
技術研究所 電磁鋼板
研究部門 主任研究員
(部長補)・工博

要旨

モータ鉄損の増加要因を解明する上で重要となる鉄心内部の磁気の状態を調査する目的で、ロータ回転中のステータ内部の磁気特性分布を探針とホール素子からなる二次元局所磁気測定プローブを用いて直接測定する方法を開発した。この方法を用いて単相誘導モータ鉄心での局所領域の磁界、磁束密度および鉄損の分布を明らかにした。さらに局所的な磁気特性に及ぼすトルクの影響やモータコア素材の影響を明らかにした。

Synopsis:

A new method for measuring the distribution of magnetic properties in a stator of a motor under rotating state has been developed by using a two-dimensional magnetic sensor with needle probes and Hall elements. By this method, the distributions of local magnetic field, flux density and iron losses in an induction motor core can be measured. The effects of loaded torque and core material properties on the motor iron losses were clarified from the viewpoint of the local magnetic properties.

1 緒 言

モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する装置であり、設備自動化に対する社会的ニーズ増大のため、その利用頻度はますます高まりつつある。近年、エネルギー消費量節減に対する社会的な要請によってモータ効率のさらなる向上が望まれており、モータの種類、構造、材料、駆動方法など多方面にわたる損失低減の努力がなされている。

モータで発生する損失のうち、モータの磁気回路を構成する鉄心部分での損失はモータ損失のかなりの部分を占めているため、鉄心素材である電磁鋼板には鉄損低減が望まれてきた。

一般に電磁界解析によるモータ鉄心の損失の計算値は、鉄心の加工歪の影響を考慮したとしても実測値に比べて小さい¹⁾。これは、電磁界解析で用いられる電磁鋼板の磁気特性値がエプスタイン法などの理想的な状態でなされたものであるため、モータの鉄心内部で生じる磁気状態が考慮されていないことに起因している。特に、磁気異方性、ヒステリシスといった磁気的性質に関しては、計算機能力の制約や基礎データの不足などの点からこれらを考慮したシミュレーションは実用段階にはない。したがってモータコア内部で生

じている現象を的確に把握し、鉄心の損失因子を厳密に評価できれば、モータの設計と素材の両面からエネルギー効率のさらなる向上が可能になると考えられる。このためには、モータコア内部の局所的な磁気特性を実測し、従来の評価法に取り込まれていない因子を抽出していく必要がある。

これまで、モータコア内部の局所的な磁気特性に関しては、3相誘導モータにおいて、ロータを固定し巻線に通電した状態でサーチコイル法や探針法を用いて行われてきた^{2,3)}。このようなロータが静止した状態でのモータの局所的な磁気特性は、ロータの二次導体に誘導される電流やそれともなうギャップ内の磁界が実際にロータが回転している場合とは異なる。そのため静止状態での磁気特性は現実のモータの駆動状態を必ずしも反映していないと考えられる。

本論文では回転状態のモータコアにおける局所領域の磁気的挙動の直接測定を目的として新しく開発した探針法とホール素子を用いた局所磁気測定方法について述べる⁴⁾。ここで採用した探針法は電磁鋼板の局所的な磁気特性を非破壊的に測定することができる方法であり、ステータ内部の磁気特性分布を調査するのに有効な方法である^{5,6)}。この手法を小型の正弦波駆動単相誘導モータに適用し、ステータ内部の磁気特性分布およびトルクや鉄心材料との関係について調査した結果を述べる。

* 平成14年10月8日原稿受付

Table 1 Specifications of tested induction motor

Input voltage	(V)	100
Frequency	(Hz)	60
Excitation waveform		Sine wave
Rated capacity	(W)	600
Flux density in teeth	(T)	1.5
Dimension	(mm)	od $\phi 112 \times h 80$

Table 2 Magnetic properties of core material

Core material		50RM400	50RMA350
$W_{15/50}$	(W/kg)	2.86	3.17
B_{50}	(T)	1.71	1.76
Stress-relief annealing		At 750°C for 2 h in N_2	

2 実験方法

2.1 モデルモータ鉄心

測定に用いた単相 2 極誘導モータコアの諸元を Table 1 に示す。ステータ鉄心の製造では Table 2 に示す磁気特性の電磁鋼板を打抜き加工し、ボルト・ナットを用いて積層鋼板を一体化した後、 N_2 雰囲気中で 750°C、2 h の歪取り焼鈍を施した後、電機子巻線を施した。巻線には、ティース幅×高さ 20 mm の空隙を設けてティース部にもプローブを挿入できるようにした。ステータコア積層の上面は探針法による磁束密度測定のために絶縁被膜の除去を行った。

2.2 測定方法

ステータコアの磁束密度の測定は、Fig. 1 に示す探針とホール素子を組み合わせた局所磁気測定プローブを用いた。Fig. 2 に測定系の概略を示す。探針には非磁性金属の針を使用した。この探針をステータコアの最上面の鋼板表面に接触させ、接触点間における電位差を検出してデジタルオシロスコープに取り込み、平均化、積

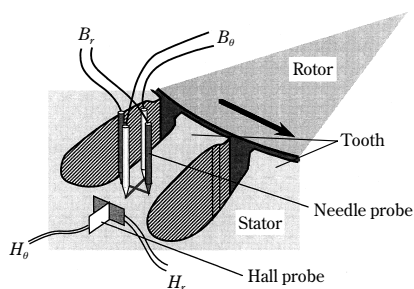


Fig. 1 Schematic view of measurement

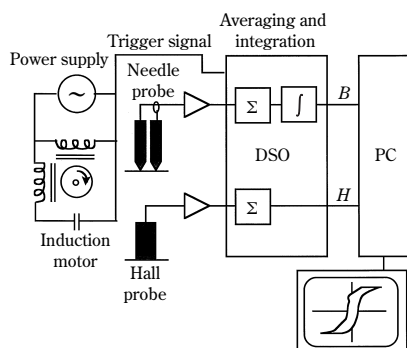


Fig. 2 Outline of measuring system

分処理後、磁束密度に換算し、各測定点ごとに磁束密度波形データとした。その際、探針対により磁束密度が検出される差交断面積は探針間隔×(板厚の 1/2) に等しいとした⁵⁾。2 本の探針間の距離は 2 mm とし、半径方向 (r 方向) と円周方向 (θ 方向) 測定用の 2 組を使用した。またステータ鉄心表面近傍の磁界強度は、小型のホール素子により測定した。ホール素子は上述の 2 本の探針間に、感受部が鉄心表面から約 1 mm の距離内に収まるように設置した。各測定点におけるホール素子出力は、同様にデジタルオシロスコープに取り込み、平均化した後、磁界強度に換算し、磁界強度波形データとした。

各測定点において半径方向および円周方向成分について 2 回ずつの測定を行い、それぞれ独立の波形データとして処理した。波高サンプル数は 1 同期周期あたり 1000 点として 2 周期測定し、それぞれ 100 回の平均化処理を行った。

磁束密度および磁界強度波形データにより描かれる B - H ループの面積から、各測定点における入力磁気エネルギーを式 (1)、(2) にしたが、動径方向成分 W_r および角度方向成分 W_θ に分けて計算し、その和を W_{2d} とした。

$$W_{2d} = (f / \rho) \oint H \cdot dB = W_r + W_\theta \dots \dots \dots (1)$$

$$W_i = (f / \rho) \oint H_i dB_i \dots \dots \dots (2)$$

$i: r$ または θ

ここで f は同期周波数、 ρ は電磁鋼板の密度である。周回積分は同期周期 1 回分について行った。各測定点での入力磁気エネルギーは無負荷時には材料の局所的な鉄損に相当する量であるが、負荷時にはモータ出力に対応するエネルギーとロータでの 2 次損失分が加算される。さらに負荷時には磁束波形の変化などによる鉄損増分が入力磁気エネルギーに加算されると考えられる。

測定はモータを交流単相 100 V で回転させた状態で行った。測定点は r 方向 2.5 mm、 θ 方向 3.75° の間隔で、鉄心の 1/4 部分の総数 95 点とした。トルク負荷条件での測定においてはブレーキモータによってトルクを加えた。

2.3 測定精度

最大磁束密度、最大磁界強度および鉄損の局所測定値の再現誤差 (10 回の試行における平均値に対する標準偏差の比率) は、磁界強度: 1% 以下、磁束密度: 1~3%、二次元鉄損: 2~7% であり、モータ内部の局所的な磁気特性分布を調査する上で十分な再現性を有している。

3 実験結果

3.1 局所磁気特性の分布

Fig. 3~5 に周波数 60 Hz、電圧 100 V、回転数 3 585 rpm で無負荷 (実測トルク 0.09 Nm) の駆動条件におけるモータ鉄心の局所的な最大磁界強度 H_m 、最大磁束密度 B_m 、および鉄損 W の r 、 θ 方向成分の分布図を示す。また、Fig. 6 は 2 次元局所鉄損 W_{2d} の分布図を示す。紙面の縦方向が主巻線中心線および電磁鋼板の圧延方向であり、横方向が補助巻線の方向である。ここでは鉄心素材を 50RM400 とした場合の結果を示した。本論文では最大磁界強度、最大磁束密度の r 、 θ 方向成分をそれぞれ H_{mr} 、 $H_{m\theta}$ 、 B_{mr} 、 $B_{m\theta}$ と表記する。

H_{mr} はティース先端で最大であり、ヨーク部に近づくにつれて減

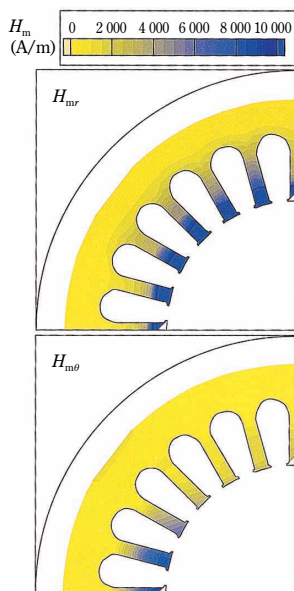


Fig. 3 Contour maps of maximum magnetic field at no load

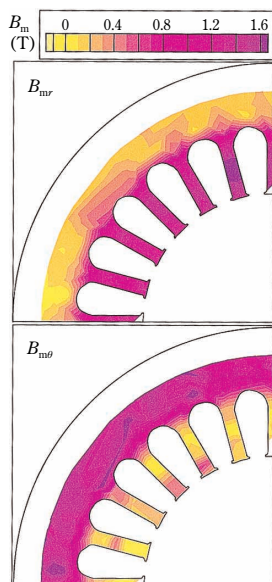


Fig. 4 Contour maps of maximum flux density at no load

少する。一方、 B_{mr} はティース部で大きい、ティース内部ではほとんど変化しない。また、 B_{mr} はヨーク内部においてスロット最外部の円弧状部分に沿ってやや高い部分が認められるとともに、ティース接合部からヨーク部方向にわずかに B_{mr} の高い部分が伸びた分布となっている。ティース部の B_{mr} の平均値は約 1.5 T であり、サーチコイルで測定したティース全断面積での磁束密度に一致した。また、ヨーク部の $B_{mθ}$ の平均値もほぼ 1.5 T であり、ティース部の B_{mr} と同程度であった。

W_r の分布傾向は H_{mr} と B_{mr} の分布を反映していると考えられる。一方、 $W_θ$ は全体的に小さいが、ティース先端部で大きくなる部分がある。

W_{2d} は、ほぼ W_r に近い分布状態であることから、 W_r が鉄損の主要因であることが分かる。

3.2 トルク負荷時の磁気特性分布

トルク負荷条件では式 (1) で示される入力磁気エネルギーは局所

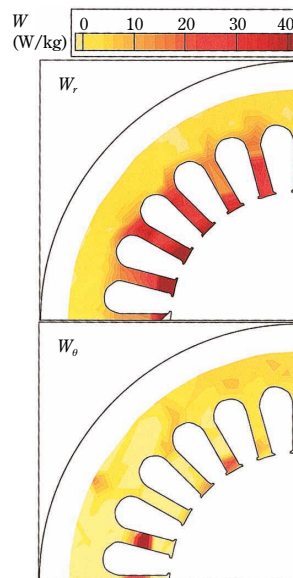
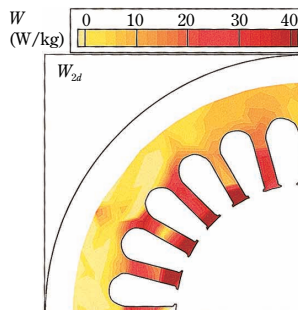
Fig. 5 Contour maps of input magnetic energy in r and $θ$ directions at no load

Fig. 6 Contour map of input magnetic energy at no load

領域の鉄損と出力エネルギーから構成される。したがって、鉄損分を除いた入力磁気エネルギーはステータからロータへ受け渡されるエネルギーの流れを示しているといえる。このような磁気エネルギーの授受における損失分（鉄損）を可能な限り低減してモータ効率を高めることがモータ鉄心設計上の主眼であることを考えれば、入力磁気エネルギーの分布を視覚的に示すことは設計上のポイントを明確にする上で極めて有用と考えられる。

トルクを負荷した条件において入力磁気エネルギーから鉄損を厳密に分離することは、局所領域の $B-H$ ループから式 (1) を用いて測定を行う本研究の方法では原理的に不可能である。そこで本稿では鉄損とモータ出力のエネルギーと二次損失分の総和である局所領域の入力磁気エネルギーに関する結果について述べる。

鉄心材料として 50RM400 を、周波数 60 Hz、100 V の正弦波電圧、トルク 0.98 Nm の駆動条件で測定し、式 (1) で算出した局所入力磁気エネルギー (W_{2d}) の分布を Fig. 7 に示す。ほぼ無負荷に近い低トルク (0.09 Nm) での W_{2d} の分布 (Fig. 6) と比較すると、トルクの負荷によって各測定点における入力磁気エネルギーが増加しており、とくにティース部での増加が大きいことが分かる。

r 方向、 $θ$ 方向の局所磁気測定値をティース、ヨーク部それぞれの内部で平均した値とトルクとの関係を Fig. 8 に示す。最大磁界強度のティース部 r 成分およびヨーク部 r 、 $θ$ 成分ではトルクの増加による大きな変化が認められないのに対し、ティース部 $θ$ 成分はトルクの増加により著しく増加する。最大磁束密度については、い

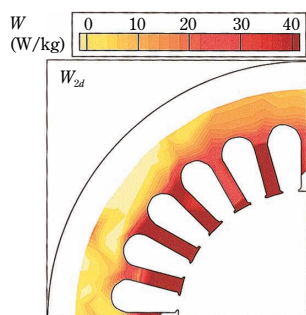


Fig. 7 Contour map of input magnetic energy at a torque of 0.98 Nm

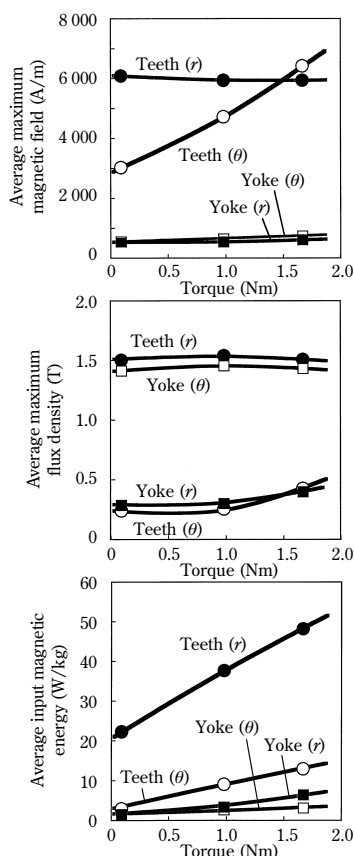


Fig. 8 Torque dependence of averaged local magnetic properties

ずれの成分も変化は小さいが、ティース部 θ 成分とヨーク部 r 成分がやや増加する傾向を示す。一方、入力磁気エネルギーは、ティース部 r 成分が著しく増加し、次いでティース部 θ 成分の増加が大きい。ヨーク部では r , θ 成分ともやや増加する。これらの図から、無負荷損すなわち鉄損分はティース部の r 成分が多くを占めていること、また、出力分に相当する磁気エネルギーもまた主としてティース部 r 成分に担われていることが示唆される。

Fig. 9 にステータの r 方向の位置に対する局所磁界強度の θ 成分の分布を示す。ティース部先端に近づくほど磁界強度が強くなり、トルクの増加によってこの傾向がより顕著となっている。このようなトルクの増加にともなう磁界強度の θ 成分の増加は、誘導によるロータ磁極と電機子電流との位相ずれがトルクの増大とともに増加することによって考えられる。

3.3 磁気特性分布の鉄心材料依存性

鉄心材料として JIS 準拠材 50RM400 と素材磁束密度の高い歪取

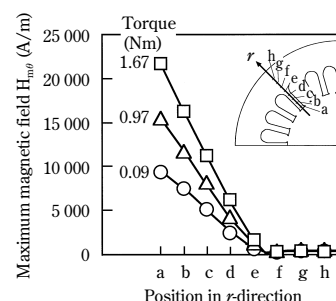
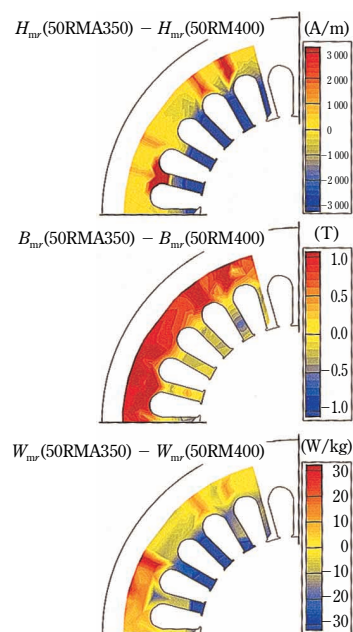

 Fig. 9 Distribution of θ component of maximum magnetic field at various torques


Fig. 10 Contour maps of difference in local magnetic properties between 50RMA350 and 50RM400

焼鈍後低鉄損材 50RMA350 を用い、周波数 60 Hz, 100 V の正弦波電圧、無負荷（実測トルク 0.09 Nm）の駆動条件において局所磁気特性分布を測定した。これら局所磁気特性の差分（50RMA350 - 50RM400）を Fig. 10 に示す。ここでのトルクは十分低いため入力磁気エネルギーに出力のエネルギーがほとんど含まれないので、入力磁気エネルギーはほぼ鉄損に等しいと考えられる。

最大磁界強度は、ティース部では 50RMA350 が明らかに低く、ヨーク部では同程度の値を示す。一方、磁束密度は、ティース部では同程度であり、ヨーク部では 50RMA350 が高くなる傾向にある。また、鉄損はティース部では 50RMA350 が低く、ヨーク部では同程度の値を示した。その結果、全体的には 50RMA350 の方が低鉄損となる。

以上の結果から、誘導モータでは高磁束密度を有する材料の方が有利となるのは、低磁化力で所定の磁束密度レベルが得られるためであり、とくにティース部でこのような効果が顕著であるといえる。

4 結 言

探針法とホール素子による局所磁気測定法を開発した。この手法を用いて回転状態の単相誘導モータ鉄心の局所磁気特性分布をトルク負荷条件やコア材料を変更して測定し、以下の知見を得た。

- (1) トルクを負荷した場合、ティース部の磁界強度の周方向成分が増加した。
- (2) トルクを負荷した場合、鉄心に流入する磁気エネルギーの増加分は、主としてティース部磁化の動径方向成分によって担われることが示唆される。
- (3) 本誘導モータにおいて磁束密度の高い歪取焼鈍後低鉄損材 RMA を用いた場合、低磁化力での励磁が可能である点で有利であることが、局所磁気測定によって明らかになった。

参考文献

- 1) 千田邦浩, 本田厚人, 石田昌義, 秋山勇治: 電気学会産業応用部門大会講演論文集, (2002)3, 1507
- 2) 矢野 隆, 榎園正人, 桑原克己, 芹川一朗, 岡田 将: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-82-72, (1982), 101
- 3) 榎園正人, 森川雅也, 黒川裕基, J.D.Sievert: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-95-106, (1995), 69
- 4) 石田昌義, 本田厚人, 小松原道郎, 佐藤圭司, 大山 勇: 電気学会回転機研究会資料, RM-99-22, (1999), 35
- 5) 山口俊尚, 今村正明, 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 本田厚人, 山本孝明: 電気学会論文誌, A115, (1995), 50
- 6) 千田邦浩, 石田昌義, 佐藤圭司, 小松原道郎, 山口俊尚: 電気学会論文誌, A117, (1997), 942
- 7) A. Honda, B. Fukuda, I. Ohyama, and Y. Mine: *J. Mater. Eng.*, **12**(1990), 141