The Magnetics Society of Japan

日本応用磁気学会誌 21, 701-704 (1997)

二次元磁気測定による三相誘導電動機モデルの損失分布

Distribution of the Loss in a Three Phase-Induction Motor Model for Two-Dimensional Magnetic Measurement

榎園正人・川村耕世・森川雅也・J. D. Sievert*・芹川一郎*
大分大学工学部，大分県大分市旦野原700番地（〒870-11）
*Physikalische Technische Bundesanstalt, *3300 Braunschweig, Germany*
**三菱電機株式会社長崎製作所，長崎市丸尾町6番14号（〒850-91）

M. Enokizono, K. Kawamura, M. Morikawa, J. D. Sievert,* and I. Serikawa**
Faculty of Engineering, Oita University, *700 Dannoharu, Oita 870-11*
*Physikalische Technische Bundesanstalt, *3300 Braunschweig, Germany*
**Mitsubishi Electric Corporation, Nagasaki Works, *6-14 Maruo-machi, Nagasaki 850-91*

This paper presents the local magnetic properties measured in a three-phase induction motor model core. The relationship between the magnetic field strength vector H and the magnetic flux density vector B was obtained by measurements with a special sensor using the H-coil method and the double-needle method. As a result, the relationship between the H-vector and the B-vector was clarified, and it is shown that the local properties in an actual core are vectorial in nature.

Key words: two-dimensional magnetic measurement, special sensor, stylus probe method, local magnetic properties, iron loss

1. はじめに

電気機器の高効率化の手段として鉄損低減が挙げられるが，鉄損を低減するためには電気機器に使用される材料の磁気特性を詳しく把握する必要がある．実際の機器内部では回転磁束が発生しており，損失増大の要因の一つになっていることが知られている．しかし，従来の磁気特性の測定法であるエプスタイン法や単板磁気試験法は交番磁束条件下のみを対象とし，ベクトル量であるはずの磁界強度と磁束密度を測定方向への写像量のスカラー値として測定しており，材料特性を正確に把握しているとはいえない[1)~3)]．そこで交番，回転のさまざまな磁束条件下において，材料中の磁界強度と磁束密度をベクトルとして測定をする二次元磁気特性測定法が提案され，これまで当研究室では二次元磁気特性測定装置を用いて任意の回転磁束あるいは交番磁束条件下の材料の磁気特性を測定してきた[4)]．また，実際に使用した状態における機器内部の磁気特性を把握するために過去に各種電気機器のモデル鉄心を作成して実測を行われたが[5)]，いずれも磁束密度分布のみであった．これに対し我々は，磁界強度と磁束密度の両ベクトル間に着目した測定を可能にした二次元磁気特性センサーを考案し，変圧器モデル鉄心内の二次元磁気特性分布を報告した[6)]．本論文では構造上においても複雑な三相誘導機のモデル鉄心を作成し，従来より小型化した二次元磁気特性測定用センサーを用いて磁界強度ベクトルと磁束密度ベクトルの関係を明らかにする二次元磁気特性分布を測定し，そして，測定値を基にして損失分布を求めたので，その結果を報告する．

2. 測定装置および測定モデル

2.1 測定センサー

Fig. 1 に二次元磁気特性測定用の特殊センサーを示す．図のように本センサーでは磁束密度 B の測定に探針法を採用しており，x 方向と y 方向をそれぞれ測定するために二組付いている．探針間の距離は 15 mm である．また探針の内部にはバネがあり，測定対象物に対し探針先端の高低を調整して4探針を接触できるようにしてある．磁界強度 H の測定にはセンサー中央下部に配してあるHコイルを使用している．このコイルは 0.04 mm のホルマール線を使用し，ベークライトの上に H_x コイルを巻き，さらにその上に直交して H_y コイルを巻いており，エリアターンは H_x コイルが 22.5 cm^2，H_y コイルが 24.5 cm^2 である．また，探針の位置は H_x コイルの x 軸および y 軸の延長線上である．

本センサーによって測定される磁束密度 B，磁界強度 H は次の二つの式によって得られる[7),8)]．

$$B_i = \frac{2}{S_{Bi}} \int e_{Bi} dt$$

$$H_i = \frac{1}{S_{Hi} N_{Hi}} \int e_{Hi} dt$$

ただし，e_B は探針，e_H はHコイルによる出力電圧，S_B は探針間の距離と鋼板1枚の厚さの積，$S_H N_H$ はHコイルの断面積と巻数の積である．添字 i (x or y) は方向成分を示す．

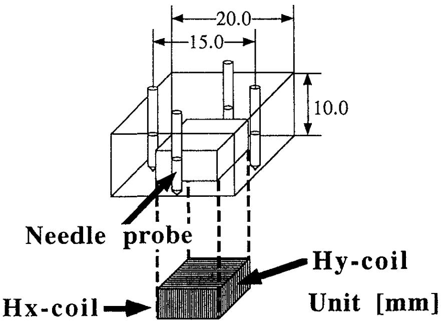


Fig. 1 Structure of the sensor for two dimensional magnetic measurement.

NII-Electronic Library Service

2.2 三相誘導電動機モデルおよび測定システム

Fig. 2 に測定に用いた三相誘導電動機の鉄心の測定点を示す．Fig. 3 は構造とスロット番号および施したコイルの位相を示す．本誘導機鉄心は無方向性けい素鋼板で，固定子の最大径は約 800 mm, 鋼板厚は 0.35 mm である．三相二極誘導機モデ

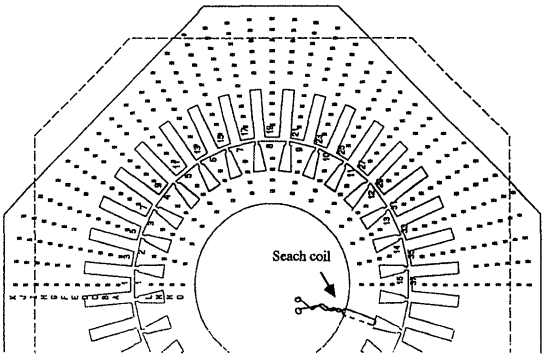


Fig. 2 Measurement points.

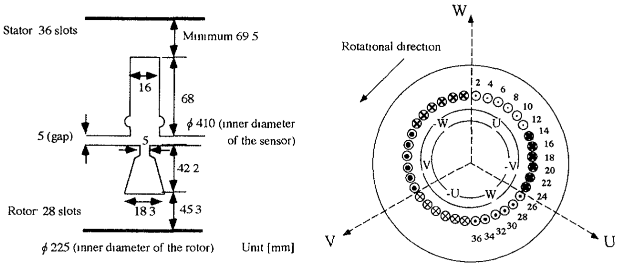


Fig. 3 Structure of the three-phase induction motor model.

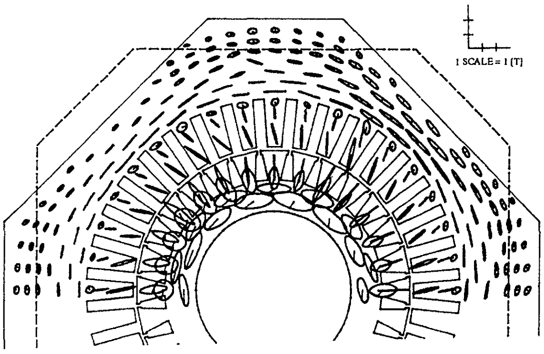


Fig. 4 Distribution of the rotational magnetic flux density (B_a = 0.6 T).

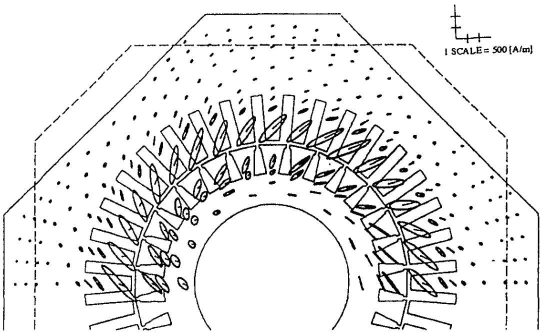


Fig. 5 Distribution of the rotational magnetic field strength (B_a = 0.6 T).

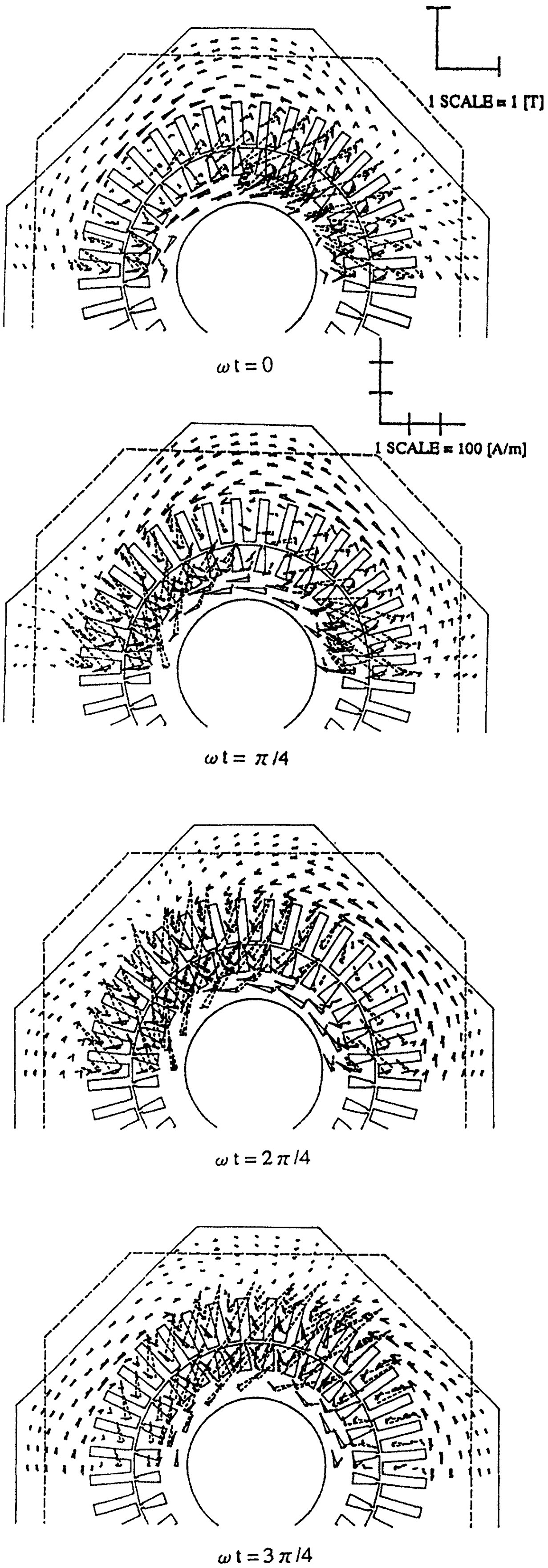


Fig. 6 Distribution of the H-vector and B-vector (B_a = 0.2 T).

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

ルであり固定子歯数は 36，回転子歯数は 28，積層枚数は 20 枚である．また，1 スロット当たりのコイル巻数は 24 ターン，各コイルは直列に接続し単層巻きとしており，コイはスロットの外側から 1/3 領域部に施設されている．回転子は固定してあり，二次側導体は入れていない．よって，条件として slip＝0 であると仮定して測定をしている．

また本測定では，Fig. 2 に示すように回転子の鉄心背部外側に探りコイルを施し流れる磁束密度の測定をし，これを基準値 B_a（実効値）にしている．

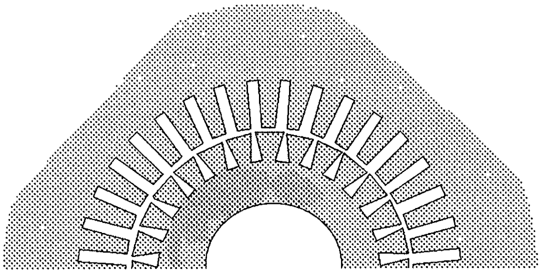
測定はセンサーおよび探りコイルからの各出力電圧を差動増幅器で増幅し，AD コンバーターを介してコンピューターに取り込んで行った．励磁周波数は 60 Hz，サンプリング周波数は 10 kHz で，サンプリング点数は 1024 点としてある．

3. 測定結果および考察

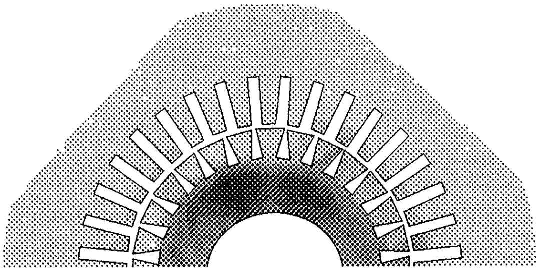
3.1 回転磁束分布および回転磁界強度分布

Fig. 4 と 5 に三相誘導電動機モデルの B_a＝0.6 T における回転磁束密度分布，回転磁界強度分布を示す．図から固定子の鉄心背部において回転方向の交番磁束が発生していることがわかる．また固定子，回転子の歯部では回転方向にやや傾いた半径方向の交番磁束が発生している．また歯の根本において回転磁束が存在することが認められる．回転磁界強度分布においては歯部で半径方向から長軸の傾いた回転磁界が発生している．今回はこの他にも B_a＝0.2 T, 0.4 T についても測定を行ったが B および H の大きさの変化を除けば同じような測定結果であった．

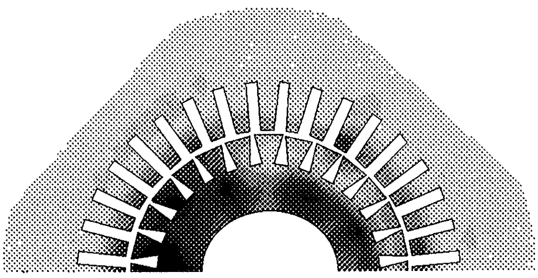
Fig. 6 には B_a＝0.2 T において 1 周期を 8 分割したものの前



(a) Ba = 0.2 T



(b) Ba = 0.4 T



(c) Ba = 0.6 T

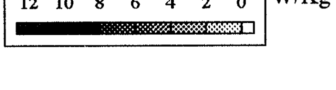
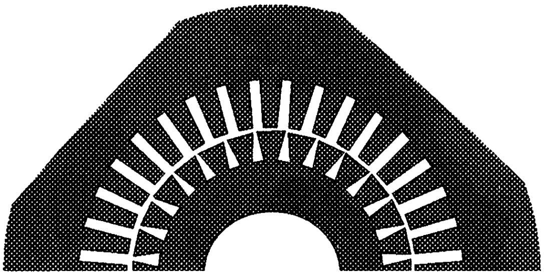
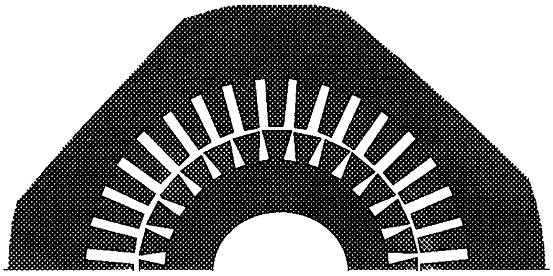


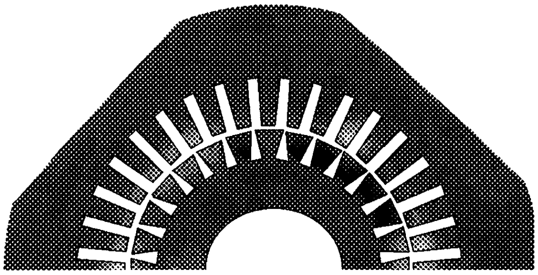
Fig. 7 Distribution of the total iron loss.



(a) Ba= 0.2 T



(b) Ba= 0.4 T



(c) Ba= 0.6 T

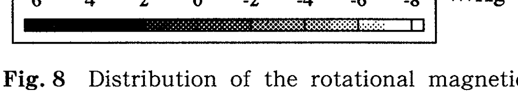


Fig. 8 Distribution of the rotational magnetic field iron loss.

NII-Electronic Library Service

The Magnetics Society of Japan

半四つの磁束密度ベクトルおよび磁界強度ベクトルの分布を示す．破線が H ベクトル，実線が B ベクトルを表す．

誘導機では固定子の一次巻き線によって作られるマクロな回転磁界の回転方向に対して固定子の各点で作られる局所的な回転磁界の回転方向は逆になる．また，一般的に無方向性けい素鋼板内においては回転磁界がかかった場合，異方性が弱いため，B ベクトルは H ベクトルに対して常に H ベクトルが先行してともに回転する[3]．つまり，本実験では回転子の回転方向を反時計回りとしているので，固定子の各点の磁界強度の回転方向は時計回りになり，回転子の各点の磁界強度の回転方向は反時計回りとなる．そして，B ベクトルは H ベクトルに遅れて同じ方向に回転しているはずである．しかしながらこのベクトル図においては，B ベクトルが H ベクトルより進んでいる点もあり，その位相差は一定とはならない．

3.2 損失計算

本論文における鉄損の測定は，二次元磁気特性測定法に基づく次の 2 種類の式によって導出した[8]．

$$P_{\mathrm{r}}=\frac{\omega}{\rho T}\int_0^T(H_xB_y-H_yB_x)\mathrm{d}t$$

$$P_{\mathrm{t}}=\frac{1}{\rho T}\int_0^T\left(H_x\frac{\mathrm{d}B_x}{\mathrm{d}t}+H_y\frac{\mathrm{d}B_y}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t$$

ただし，T は励磁周期，ρ は密度，ω は各周波数である．

P_{t}（全鉄損）は一次元測定法による鉄損の計算法を二次元的に考えたもので，各方向のヒステリシスループの面積の和から得られる．

P_{r}（回転磁束鉄損）は H ベクトルと B ベクトルの間のトルク損失に基づき定義された計算式である．この回転磁束鉄損は H ベクトルと B ベクトルの間のトルクを 1 周期積分して得られるものである．

Fig. 7 に全鉄損分布を示し，Fig. 8 に回転磁束鉄損分布を示す．全鉄損分布では回転子に他の部分に比べて大きな鉄損が現れている．これは回転子に二次導体が入っていないため回転子内部深くまで磁束が侵入することが原因と思われる．固定子を見ると磁束が低い時には各測定点の鉄損は大差がない．しかし，磁束が高くなるに従って強い磁束密度が測定された歯の部分と回転磁束が発生していた歯の付け根の部分の鉄損が他の部分に比べて大きくなっていることがわかる．

回転磁束鉄損分布では磁束が低いときには歯の付け根の付近に部分的に損失が目立つが，鉄心の磁束レベルが高くなるに従って全体的に損失が大きくなり歯部を除いた部分の鉄損は大差がなくなってくる．これらのことから誘導機では歯の部分で損失が大きく，全体的に回転損失が発生していると考えられる．

4. まとめ

本研究では二次元磁気特性測定センサーを用いて，三相誘導機における回転磁束および回転磁界強度の分布の測定を行い以下の点を明らかにした．

1) 三相誘導機における磁気特性分布を二次元的なベクトル関係で明らかにした．

2) 誘導機内部では歯の部分に大きな損失が現れることが明らかになった．

3) 誘導機鉄心内部の磁束レベルが高くなると回転損失が鉄心に全体的に現れることが明らかになった．

文　献

1) M. Enokizono, T. Suzuki, and J. Sievert: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2067 (1990).
2) M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert, and J. Xu: *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 2562 (1990).
3) M. Enokizono, G. Shirakawa, T. Suzuki, and J. Sievert: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **15**, 261 (1991).
4) M. Enokizono, K. Yuki, and S. Kawano: Proceedings of CEFC, P2C04 (1994).
5) 榎園・桑原・岡田・矢野：電学論 B, **103**, 844 (1982).
6) 榎園・戸高・川村・J. D. Sievert: 日本 AEM 学会誌，**1**, (1993).
7) W. Brix, K. A. Hemple, and F. Schulte: *IEEE Trans. Magn.*, **20**, 1708 (1984).
8) J. Sievert: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 2553 (1990).

1996 年 10 月 16 日受理，1997 年 1 月 16 日採録

NII-Electronic Library Service