

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420261

研究課題名(和文) 鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析による誘導機の漂遊負荷損の低減

研究課題名(英文) Reduction of stray load losses in induction motor using magnetic field analysis taking account of laminated structure and eddy currents in steel plates of core

研究代表者

村松 和弘 (Muramatsu, Kazuhiro)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30263627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を均質化手法により考慮した磁界解析を用いて誘導機の漂遊負荷損の低減を検討するため、まず、本均質化手法を誘導機の鉄芯中の回転磁界が考慮できるように拡張した。次に、誘導機鉄芯の鋼板中に流れる横流による損失を実用的な計算時間で評価できる二次元・三次元併用解析法を開発した。さらに、電磁力、磁歪、及び焼き嵌めによる応力が鉄損増加に及ぼす影響を考慮するため、これらの応力を考慮した鉄損解析法を開発した。最後に、鉄芯の積層構造やスロット高調波を考慮した誘導機の解析を行い、鉄芯の積層構造による鉄芯端部での磁束の集中が漂遊負荷損の一因であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, to investigate the reduction of stray load losses in induction motors using the magnetic field analysis taking account of the laminated structure and the eddy current in steel plate of core, first, this homogenization technique is expanded to apply induction motors in which fluxes rotate. Then, a practical method of coupled 2-D and 3-D eddy current analyses to evaluate inter-bar current losses in cage induction motors is also developed. Next, a method to evaluate iron loss taking account of stress due to electromagnetic force, magnetostriction, and shrink-fitting is also developed. Finally, the magnetic field analyses of actual induction motors taking account of laminated structure and slot harmonics are carried out to evaluate stray load losses. It is shown that flux concentration in the surface of core causes stray load losses.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器工学 磁界解析 積層鉄芯 誘導機 鉄損 漂遊負荷損

1. 研究開始当初の背景

世界の電力消費量全体に対するモータが占める割合は40%を超えており、CO₂削減の観点から、IEC60034-30で規定されるモータの効率レベル(IE1:標準効率, IE2:高効率, IE3:プレミアム効率)に基づいた規制が、世界中で制定されている。日本では、現在使用されているモータのほとんどがIE1であるが、仮に日本の全てのモータがIE3に置き換わったとすると、消費電力全体の1.5%に相当する年間155億kWhの消費電力量の削減が可能になると試算され(資源エネルギー庁「平成21年度エネルギー消費機器実態等調査報告書」より)、これは極めて大きな削減効果である。そのため、日本でも2015年に、IE3の規制導入が予定されており、現在、モータの高効率化は緊急の課題となっている。

モータ製造量のほとんどを占め、上記規制の対象である誘導機の高効率化を図るためには、鉄損や銅損だけでなく、これまで十分に検討がなされていない漂遊負荷損の発生メカニズムを明らかにしてその低減法を検討する必要がある。

漂遊負荷損の低減には、磁界解析が有効と考えるが、例えば、スロット高調波に起因する漂遊負荷損の評価では鋼板中の面内方向の磁束による渦電流、また鉄芯端部での漏れ磁束に起因する漂遊負荷損では積層鉄芯の層間ギャップや積層方向の磁束による渦電流の考慮が必要となるが、現状の回転機の磁界解析技術では、積層鉄芯は層間ギャップや鋼板中の渦電流を無視した塊状鉄芯でモデル化されるため、漂遊負荷損の発生メカニズムを直接検討することができない。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが開発した静止器用の「積層鉄芯の層間ギャップと鋼板中の渦電流を考慮した鉄損解析法」を回転機用に改良するなど、誘導機の漂遊負荷損の発生メカニズムを検討するために必要な各種磁界解析法を開発する。そして、鉄芯の積層構造を考慮した誘導機の三次元磁界解析などを行うことにより、漂遊負荷損の発生メカニズムを明らかにし、効率を現在のIE1のからIE3まで高効率化できる誘導機を開発する。

3. 研究の方法

まず、誘導機の漂遊負荷損を評価するため、以下の解析法を開発した。

- (1) 回転磁界中における鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析法
- (2) 横流損の二次元・三次元併用解析法
- (3) 応力を考慮した鉄損解析法

次に、誘導機の漂遊負荷損の発生メカニズムを明らかにするため、以下の解析を行った。

- (4) 鉄芯の積層構造を考慮した誘導機の三次元磁界解析
- (5) スロット高調波を考慮した誘導機の漂遊負荷損の解析

4. 研究成果

以下、前節の(1)～(5)のそれぞれの項目について、研究成果を述べる。

(1) 回転磁界中における鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析法

研究代表者らは、静止器用に「鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析法」を既に開発済みである。しかしながら、本解析法では、解析モデル全体の解析(全体解析)の鉄芯中の各要素に与える実効透磁率を算出する鋼板解析に一次元解析を用いているため、磁束の方向が変化する誘導機には適用できない。そのため、回転磁界が考慮できるように鋼板解析を三次元鋼板解析に拡張した。

図1.1に、三次元鋼板解析の分割図を示す。開発した三次元鋼板解析では、全体解析で得られた要素の磁束密度ベクトル B から磁気ベクトルポテンシャル A の境界条件を求め、渦電流解析を行うことにより、全体解析に与える実効透磁率を計算する。

開発した三次元鋼板解析の有用性を検討するため、図1.2に示す簡易な積層鉄芯モデルの解析を行った。本モデルは、4枚の積層鋼板に磁束密度0.01T一定の回転磁束を与えるモデルである。本モデルを、積層構造を忠実に考慮した実モデル、上記積層鉄芯のモデリング手法で、鋼板解析に従来の一次元解析と今回開発した三次元解析を適用した場合で過渡解析を行い、得られた渦電流損を比較した。

図1.3に、渦電流損の時間的変化を示す。磁束の方向の変化が考慮できない従来の一次元鋼板解析では、実際の渦電流損を評価できないが、今回開発した三次元鋼板解析を用いれば、実モデルの結果と一致しており、回転機用の「鉄芯の積層構造と鋼板中の渦電流を考慮した磁界解析法」が開発できた。

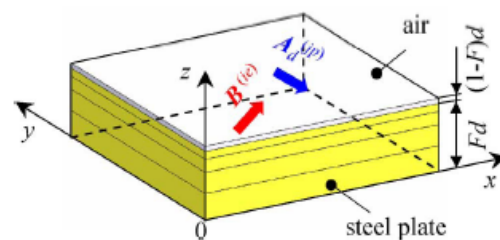


図 1.1 三次元鋼板解析 (1/2 領域)

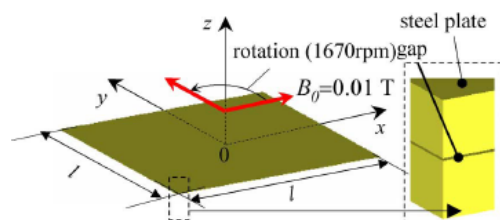


図 1.2 積層鉄芯モデル (1/2 領域)

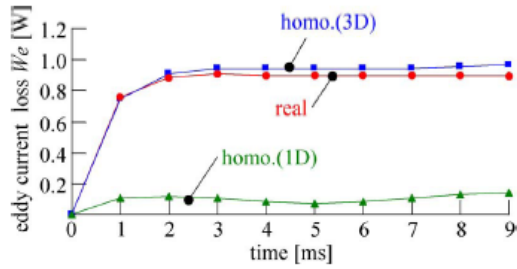


図 1.3 渦電流損の時間的変化

(2) 横流損の二次元・三次元併用解析法
 誘導機の漂遊負荷損の一つである横流損を磁界解析で検討するためには、横流が三次元的に流れるため、三次元渦電流解析が必要となる。しかしながら、誘導機の三次元解析は計算時間が膨大になってしまう。そのため、二次元解析により定常運転時の磁束分布の時間的変化を求め、この分布を用いて三次元渦電流解析により横流を後处理的に算出する実用的な二次元・三次元併用渦電流解析法を開発した。

本解析方法では、二次元解析によって得られた定常状態での磁束密度 \mathbf{B} の分布の時間的変化から、次式の電流ベクトルポテンシャル \mathbf{T} を用いた三次元渦電流解析により横流を算出する。

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \text{rot} \mathbf{T} \right) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

ここで、 σ は導電率である。

開発した提案法の妥当性を検討するため、図 2.1 に示す簡易なかご型三相誘導機モデルの横流を、図 2.1(a)の分割図を用いた完全三次元解析および提案法により求め、比較した。提案法の二次元解析の分割図は、図 2.1(b)に示すように三次元解析の断面を用いた。

図 2.2 に、完全三次元解析と提案法で得られた鉄芯上部の横流分布を示す。提案法で得られた横流の値は、完全三次元モデルより若干大きい、傾向はよく一致しており、横流損評価のための二次元・三次元併用解析法が開発できた。

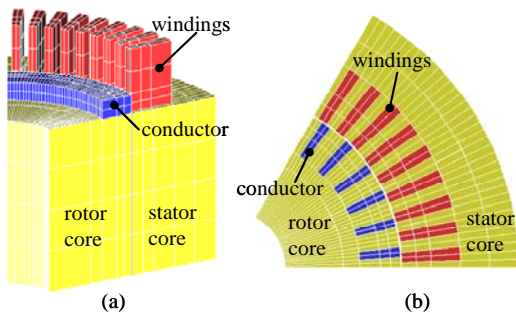


図 2.1 かご形誘導電動機モデル(a)三次元、(b)二次元モデル

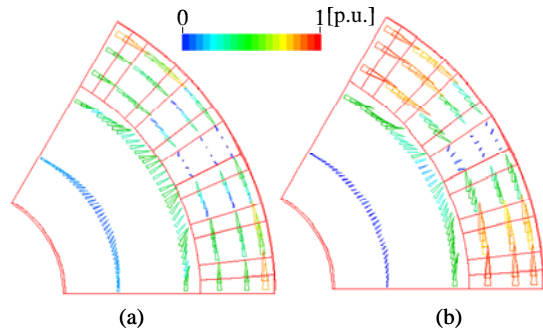


図 2.2 横流分布 (鉄芯上部) (a) 完全三次元解析, (b) 提案法 (二次元・三次元併用解析)

(3) 応力を考慮した鉄損解析法

誘導機の鉄芯には、電磁力、磁歪、焼き嵌めなどにより応力が発生し、これにより鉄損が増加する。この影響を検討するため、応力を考慮した鉄損解析法を開発した。

電磁力、磁歪力、焼き嵌めによる節点力 \mathbf{F}_n は、次式の節点力法により算出した。

$$\mathbf{F}_n = -\sum_e \int_{V_e} T_e \text{grad} N_n dv \quad (3.1)$$

ここで、 e は要素番号、 N_n は補間関数、 T_e は応力テンソルであり、応力テンソル T_e は、電磁力、磁歪力、焼き嵌めの力を求める場合、それぞれ、次式となる。

$$T_{ij}^m = B_i H_j - \delta_{ij} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H} - \int_0^{\mathbf{B}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B}) \quad (3.2)$$

$$T_{ij}^{ms} = \frac{-E\lambda}{(1+\nu)} \frac{1}{2B^2} (3B_i B_j - \delta_{ij} B^2) \quad (3.3)$$

$$T_{ij}^{\text{th}} = \frac{\delta_r}{r_{in}} \frac{E}{(1-2\nu)} \delta_{ij} \quad (3.4)$$

ここで、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} は、それぞれ、磁束密度、磁界、 E 、 ν 、 λ は、それぞれ、ヤング率、ポアソン比、磁歪定数、 r_{in} 、 δ_r は、それぞれ、ハウジングの内径、焼き嵌めの幅である。 δ_{ij} はクロネッカのデルタである。

図 3.1 に、モータ固定子の焼き嵌め、電磁力、磁歪による周方向、半径方向の応力分布を示す。これらより、固定子鉄芯内の応力は焼き嵌めによるものが支配的であることがわかる。

図 3.2 に、応力を無視、考慮した場合の鉄損曲線を用いて得られた鉄損分布を示す。応力により、鉄損が約2倍に増えており応力が鉄損増加の大きな要因であることがわかる。

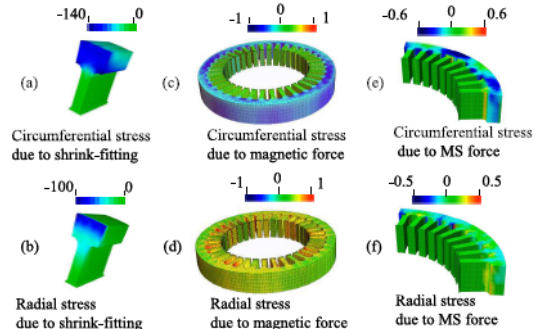


図 3.1 固定子の応力分布

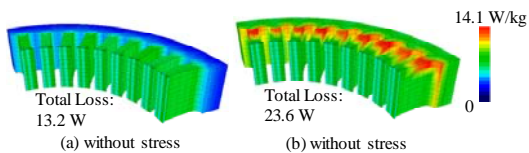


図 3.2 固定子の鉄損分布

(4) 鉄芯の積層構造を考慮した誘導機の三次元磁界解析

誘導機の漂遊負荷損の発生要因を明らかにするため、鉄芯の積層構造を考慮した三次元磁界解析を行った。

図 4.1 に、極数 6、周波数 50 Hz のかご形三相誘導電動機の解析モデルを示す。解析は対称性を考慮して 1/12 領域のみ解析した。970 rpm (すべり $s=3\%$) での定常状態を三次元過渡非線形渦電流解析により求めた。なお、積層構造が鉄損に及ぼす影響を検討するため、積層構造を無視及び考慮した場合の二通りの解析を行った。

図 4.2 に、積層構造を無視及び考慮した場合の鉄芯中央部 ($z=0$) と上部 ($z=180$) の磁束分布を示す。積層構造を無視した場合の磁束分布は z 方向で差は生じないが、考慮した場合には鉄芯上部に磁束が集中していることがわかる。これは、回転子と固定子間のギャップにより鉄芯角部に集中した磁束が、磁気抵抗が大きい層間ギャップによって鉄芯下部に侵入できず、表面に偏ってしまうからである。

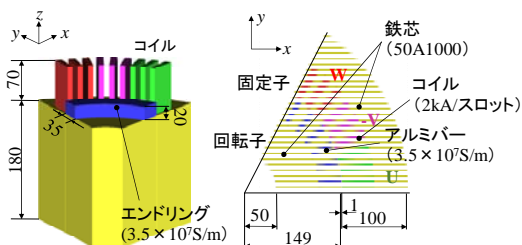


図 4.1 誘導機の三次元解析モデル

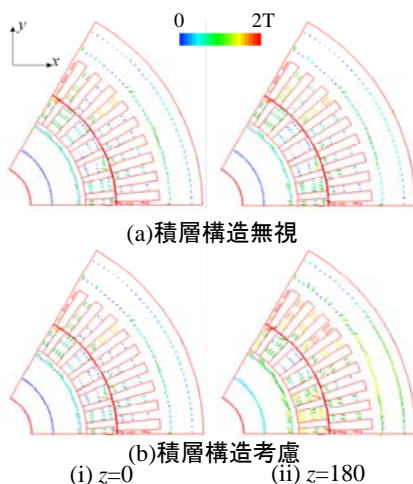


図 4.2 積層構造が磁束分布に及ぼす影響

図 4.3 に、積層構造を無視及び考慮した場合の固定子の鉄損値を示す。積層構造を考慮した場合、鉄芯上部への磁束の集中のため、鉄損値が 5.8%増加しており、例えば、鉄芯の角部にテーパを設けるなどして、この磁束の集中を緩和すれば、鉄損が低減できることがわかる。

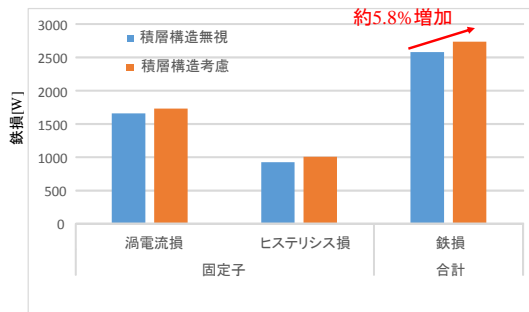


図 4.3 積層構造が鉄損に及ぼす影響

(5) スロット高調波を考慮した誘導機の漂遊負荷損の解析

誘導機の漂遊負荷損の発生要因を明らかにするため、無負荷時と負荷時の磁界解析を行った。

図 5.1 に、極数 6、周波数 50Hz のかご形三相誘導電動機の解析モデルを示す。解析は全領域を解析したが、図では 1/4 領域のみを拡大して示す。本モデルの無負荷時 1000rpm (すべり $s=0$) と負荷時 990rpm ($s=1\%$)、950rpm ($s=5\%$) の時の鉄損と二次銅損を磁界解析により算出し、漂遊負荷損を評価した。

図 5.2 に、すべり $s=0$ と 5% での鉄損分布を示す。ただし、図の鉄損は、 $s=5\%$ の鉄損の最大値で正規化して示している。すべり $s=0$ では、スロット高調波に起因する鉄損が回転子の表面に集中して発生しているが、 $s=5\%$ では、回転子の表面の鉄損は小さくなり、固定子の表面および内部の鉄損が増加していることがわかる。

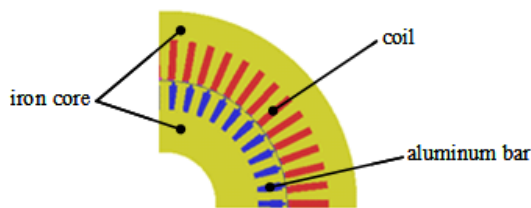


図 5.1 誘導機の二次元解析モデル

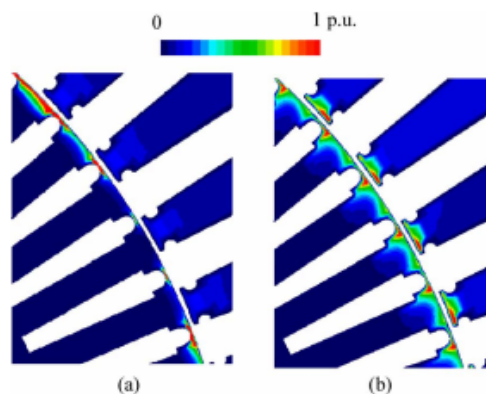


図 5.2 鉄損分布, (a) $s=0$, (b) $s=5\%$

図 5.3 に、すべり $s=0$ と 1%, 5% での回転子と固定子それぞれの鉄損, バーの高調波銅損および損失合計を示す. 参考のため, 無負荷試験で得られた実測値も示す. 計算で得られた $s=0$ の損失合計は, 実測値と約 15% の誤差があるが, これは, 実測値が完全な同期速度でないことや鉄心の加工劣化等による損失増加の影響であると考えられる. 漂遊負荷損は, バーの高調波銅損, 固定子鉄損の増加が大きく, $s=1\%$ 時の損失合計は $s=0$ に比べて約 30% 増加しており, 誘導機の損失低減には, これら漂遊負荷損を考慮して検討する必要がある.

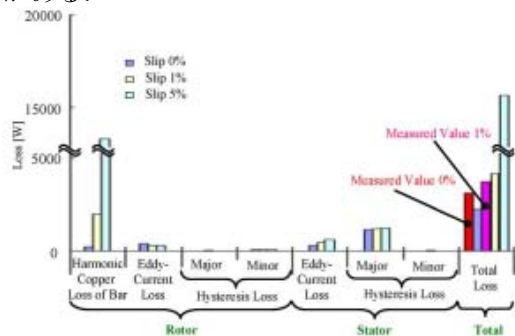


図 5.3 無負荷時と負荷時の鉄損の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Hassan Ebrahimi, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Takashi Okitsu, and Daiki Matsuhashi, "Effects of stress and magnetostriction on loss and vibration characteristics of motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 3, no. 8201404, 2016. 査読有
- ② Yanhui Gao, Tatsunori Sanmaru, Genki Urabe, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Kazuaki Nagaki, Yuichi Kizaki, Tsuyoshi Sakamoto, "Evaluation of stray load losses in cores and secondary conductors of induction motor using magnetic field analysis", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1965-1968, 2013. 査読有
- ③ Lin Cheng, Shinichi Sudo, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, "Homogenization technique of laminated core taking account of eddy currents under rotational flux without edge effect", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1969-1972, 2013. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① 古賀大貴, 高 炎輝, 堂 蘭 浩, 村松和弘, 「鉄芯の積層構造を考慮した誘導機の磁界解析」, 平成 27 年度 (第 68 回) 電気・情報関係学会九州支部連合大会, no. 13-1P-10, 福岡大, 2015.9
- ② Hassan Ebrahimi, Yanhui Gao, Hiroshi

Dozono, Kazuhiro Muramatsu, "Effect of Shrink-Fitting and Magnetostriction on Core Loss and Vibration of Permanent Magnet Motor," The 20th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2015), no. PD5-9, Montreal, Canada, 2015. 7

- ③ Ebrahimi Hassan, Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Takashi Okitsu, Daiki Matsuhashi, "Effects of stress and magnetostriction on loss and vibration characteristics of motor," The papers of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, nos. SA-15-053, RM-15-045, Miyakojima, 2015. 3
- ④ Kazuhiro Muramatsu, Yanhui Gao, Shohei Oyama, Hiroshi Dozono, "Coupled 2-D and 3-D eddy current analyses for evaluating inter-bar current losses in cage induction motors," The Sixteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2014), no. OC2-3, Annecy, France, 2014. 5
- ⑤ 大山祥平, 浦辺元基, 村松和弘, 高 炎輝: 「二次元・三次元併用法によるかご形誘導機の横流の評価」, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, no. 5-063, 愛媛大, 2014. 3.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村松 和弘 (MURAMATSU KAZUHIRO)
佐賀大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 3 0 2 6 3 6 2 7

(2) 研究分担者

高 炎輝 (GAO YANHUI)
佐賀大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 4 0 5 8 6 2 8 6