

加工残留応力による磁気異方性を考慮した鉄損解析手法の検討*

Study of Computation Method of Iron Loss Considering Magnetic Isotropic by Processing residual stress

土井 智史
Satoshi DOI

藤原 耕二
Koji FUJIWARA

高橋 康人
Yasuhito TAKAHASHI

岡崎 恵一
Keiichi OKAZAKI

青木 哲也
Tetsuya AOKI

Mass productions of the motor core such as the blanking of the electromagnetic steel sheet and the shrink fit cause the residual strain in the material, processing strain, which prevents the movement of magnetic walls and increases the magnetic loss in the motor. Conventionally, the increase of the magnetic loss by the processing stress was evaluated with trial products, because it couldn't be done in the design phase. Particularly, the residual stress generated by processing has a complicated relationship with the direction of the magnetization vector, which has made it difficult to estimate iron loss considering processing strain.

So this paper clarified the relationship between the stress tensor and the magnetization vector, and proposed a consideration method of the stress in magnetic field analysis. As a result of validating the development method with the ring test piece, we confirmed that the intended modeling can be reproduced. Furthermore, we showed the usefulness of the development method in the motor model.

Key words :

ron loss, residual stress, magnetic isotropic, electric steel sheet, motor

1. 序論

近年、自動車の排ガス規制の厳格化や低燃費への需要の高まりから、自動車の電動化が急速に進められている。その中でも従来の内燃機関と電動モータによるハイブリッド駆動自動車は自動車メーカー各社から製品化されており、拡張競争が激化している。このため駆動用モータにおいては低コスト化要求が厳しくなっており、モータのさらなる小型・高回転化が検討されている。しかし一般的にモータは回転数の上昇に伴って

損失が増大することから、小型化には低損失化との両立が必須となっている。

モータの損失には巻線で発生するジュール損失である銅損、モータコアで発生する磁氣的損失である鉄損、軸受けの摺動抵抗や風損である機械損に大別される。高回転化においては、特に鉄損の増大が懸念されることから、モータコアの材料には、低鉄損である電磁鋼板の適用が検討される。一方、モータコアの製造工程では、量産性を目的として、打抜き、かしめ、焼嵌めなどの生産性の高い加工方法を採用することが一般的

* (一社) 電気学会の許可を得て、電気学会論文誌 B Vol.138 No.1 (2018 年 1 月 1 日発行) より一部加筆して転載

であるが、加工時のひずみ（以下、加工ひずみ）が材料に残留するため、鉄損を増大させる要因となる。特に、低鉄損な材料ほどひずみに対する感度が高いことや、小型化によってコア全体に占める加工影響範囲が増大することから、小型・高効率化を突き詰めた設計においては、加工ひずみによる損失増加が大きな問題となる。このため、設計段階における加工ひずみを考慮した鉄損予測が、モータの最適化において重要であると考える。

従来、様々な加工ひずみを考慮した鉄損予測手法の提案がなされてきた。しかし、それらは正弦波磁束を前提とするスタインメッツの式を基礎としたモデル化であり、モータの高回転化によって顕著となる高調波磁束による鉄損（以下、高調波鉄損）を精度良く考慮することができなかった。また、残留応力と磁化方向の取り扱い方法について検討がなされてきたが、理論的な裏付けが十分とは言えないものであったり¹⁾、応力の各方向に対する磁気特性の膨大な測定データが必要であった²⁾³⁾。

そこで我々は、モータの加工において最も汎用的な打抜き加工によるひずみを考慮した高調波鉄損のモデル化手法について検討した⁴⁾。ここでは、残留応力と磁化方向の計算上の取り扱い方法にも言及しており、打ち抜いて製作したリングテストピースを対象に、基礎的な検証を行い、応力が磁気特性に与える影響の考え方の妥当性を示している。しかし、単純なリングテストピースでは、残留応力と磁化の関係が予め分かるため、応力による磁気特性の影響をモデル化可能であったのに対して、Fig. 1に示すように、モータ内部の磁束の流れはより複雑化することから、予め応力と磁化の相対方向を決めることができない。

したがって、文献4)の鉄損予測手法をモータへ適用する場合には、磁束密度分布および鉄損を求める際に、応力と磁化の複雑な方向の影響を如何に取り扱うが問題となる。そこで本論文では、そのモデル化方法について検討する。

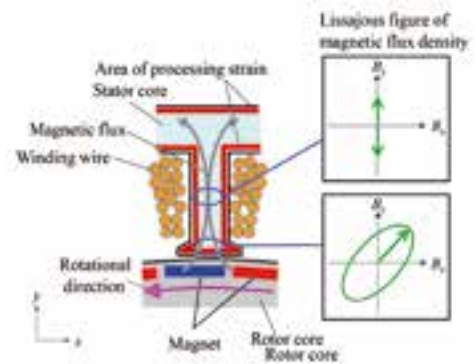


Fig. 1 Flow of magnetic flux in electric motor

2. 鉄損解析方法

磁界解析によるモータの鉄損計算は、磁界分布の解析時に、鉄芯の磁気ヒステリシス（以下、ヒステリシス）および渦電流を考慮する直接計算法と、鉄芯の初磁化特性を用いた2次元静磁界解析により、1周期分の磁界分布を求め、その結果から鉄損を推定する後処理計算法に大別される。本誌では、実用的な計算時間で鉄損を予測可能な手法であることを重視し、後処理計算法において、ベクトルレイモデル⁵⁾によるヒステリシスを考慮した一次元動磁界解析を用いる⁶⁾⁷⁾。具体的な計算フローはFig. 2に示すように

- (1) 加工解析によって、塑性ひずみと残留応力分布を得る。
- (2) 2次元磁界解析において、塑性ひずみ、および残留応力分布に応じた初磁化特性の分布を与え、磁束密度分布を得る。その際、影響メカニズムの異なる塑性ひずみおよび残留応力の影響を分けて考え⁴⁾、応力の影響については、磁化方向との関係を考慮したモデル化を行う。
- (3) 上記で得た磁束密度分布および、塑性ひずみおよび残留応力の分布に応じたヒステリシス特性を与え、一次元動磁界解析によって鉄損を計算する。その際、同様に応力の影響は磁化方向との関係を考慮する。

以上より、応力が初磁化特性およびヒステリシス特性に与える影響の取り扱いが重要となることから、次節でその具体的なモデル化方法について述べる。

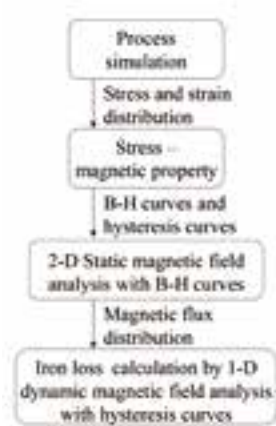


Fig. 2 Analysis flow

3. 応力と磁化方向の影響考慮手法

3.1 応力が磁化方向に与える影響

電磁鋼板を含む強磁性体は、自発磁化の方向の揃ったサイト（磁区）群によって構成される。磁区は、消磁状態ではランダムな向きであるが、外部からの磁界方向に揃う向きに回転し、磁界が取り除かれた後も磁区同士の磁氣的な摩擦により元の向きには戻らず、ヒステリシス特性を示す。そして、ひずみおよび応力は、その磁氣的摩擦増加の一因となる。

特に、応力は磁区回転の際に生ずる磁歪と呼ばれる極僅かな材料の伸び縮みを阻害し、磁氣的摩擦を増加させる。つまり応力による磁気特性の劣化は、磁歪量に比例すると考えられる。そして、磁歪量は磁化方向に対する方向性を持つ。したがって、応力による影響は磁化方向との関係性が生ずる。このため鉄損解析では、応力の大きさおよび方向と磁気特性との関係データが必要となるが、測定すべき水準が膨大となる。ただし等方性材料の場合には、磁歪量の方向性は次式で表現される⁸⁾。

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{3}{2} \lambda \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) \quad (1)$$

ここで、 l は試料長、 λ は磁歪定数、 θ は磁化方向と磁歪の観測方向との相対角度である。

(1)式より、磁化方向の磁歪を λ とすると、磁化直角方向の磁歪は $-\lambda/2$ となる。

したがって本論文では、Fig. 3に示す応力が印加され

た場合、磁気特性に影響を及ぼす応力 σ_B は次式で求めると仮定する。

$$\sigma_B = \sigma_{//} - \frac{1}{2} \sigma_{\perp} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{//}$ は法線方向が磁束密度方向の応力面における法線方向応力、 σ_{\perp} は法線方向が磁束密度と垂直な方向の応力面における法線方向応力である。

以上から、磁化方向および磁化直角方向の応力が求められれば、磁化が受ける応力値を求めることが出来る。また本論文では、電磁鋼板で特に感度が高い圧縮応力のみを考慮し、応力の符号は全て正とする。

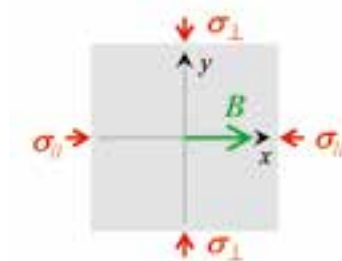


Fig. 3 Effects of stress

3.2 応力中における磁化回転の影響

Fig. 4に示すように、ある応力が印加された状態において、磁化方向の角度が ϕ 回転した場合、磁化が受ける応力の大きさを求めるためには、応力を ϕ 回転させ、磁化方向の応力と磁化直角方向の応力を求めればよい。なお、テンソルの回転は一般に次式で表される。

$$[\sigma'] = [T]^T [\sigma] [T], \quad [T] = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 σ' は回転後の応力テンソル、 T は z 軸周りの回転行列である。なお、本研究では磁束密度分布は、 $x-y$ 平面の2次元磁界解析で求めるため、 z 軸方向の応力は磁化と常に直角の関係となる。したがって、磁化回転の影響は、次式で定義する面内応力についてのみを考える。

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau \\ \tau & \sigma_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、主応力座標系を基準に用いれば、 $\sigma_{//}$ および σ_{\perp} はテンソルの回転式から以下のように表される。

$$\sigma_{//} = \sigma_1 \cos^2 \theta_B + \sigma_2 \sin^2 \theta_B \quad (5)$$

$$\sigma_{\perp} = \sigma_1 \sin^2 \theta_B + \sigma_2 \cos^2 \theta_B \quad (6)$$

ここで、 σ_1 および σ_2 は主応力成分、 θ_B は主応力座標系を基準とした場合の磁束密度ベクトルの角度であり、直交座標系との関係は次式で示される。

$$\phi = \theta_B + \tan^{-1} \left\{ \frac{\sigma_1 - \sigma_2 \pm \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + 4\tau^2}}{2\tau} \right\} \quad (7)$$

従って、磁気特性に影響を及ぼす応力 σ_B は、(6)、(7) 式を(2)式に代入することで次式の通りに整理される。

$$\sigma_B = \frac{1}{4} \{ \sigma_1 (1 + 3\cos 2\theta_B) + \sigma_2 (1 - 3\cos 2\theta_B) \} \quad (8)$$

以上から、面内応力中の磁化が受ける応力は、その方向によって変化することが分かる。これは、磁気特性が各方向によって異なることを意味する。すなわち、応力によって磁気異方性が生じると考えられる。

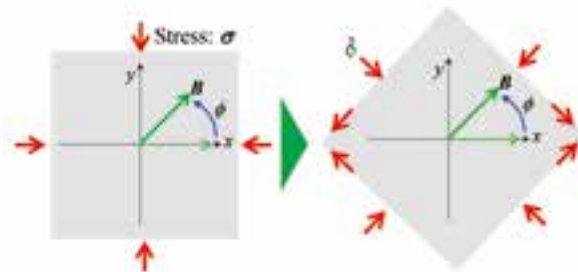


Fig. 4 Rotation of stress

3.3 応力磁気異方性を考慮した磁界解析手法

鉄心材料の磁気特性が完全な等方性を示す場合には、磁束密度ベクトル B と磁界強度ベクトル H の方向は、Fig. 5 (a) に示すように同一となる。一方、磁気異方性を示す場合には、 B と H は、Fig. 5 (b) に示すように空間的位相差を生じる。したがって、磁気異方性をモデル化する場合には、空間的位相差を考慮することが重要となる。

従来、材料の磁気異方性を取得するためには、二次元単板磁気特性試験器 (2D-SST) を用いる必要があった。しかし、測定システムが2系統分必要になり制御系が複雑化する、高磁束密度の測定が困難になる、

などの問題点があった。加えて、応力による磁気異方性を取得するためには、応力印加機構を2軸に設けることが必要になり、均一応力を印加することおよび試料の座屈防止が困難になると考えられる。

そこで、本研究では樋口らが提案する材料の磁気異方性を二次元単板磁気特性試験器 (1D-SST) による測定結果から推定する手法^{9)~11)}に着目し、応力磁気異方性へ応用することを考える。本推定法では、各方向の磁気測定用の短冊試験片を用意し、二次元磁気測定を行う。その際、単板試験片における磁界強度および磁束密度の方向は、磁気異方性によって Fig. 6 の状態であると予測される。すなわち、磁気測定で得られる磁界強度は、磁束密度ベクトルの接線方向成分 H_t のみとなる。上述のように、空間的位相差を把握するためには、磁界強度の直角成分 H_θ が必要となることから、次式で表される磁気エネルギー F に着目する。

$$\begin{aligned} F(B, \theta_B) &= \int_0^B H \cdot dB \\ &= \int_0^B H_t dB = \int_0^B H \cos(\theta_H - \theta_B) dB \end{aligned} \quad (9)$$

ここで θ_B は圧延方向を基準とした場合の磁束密度の角度、 θ_H は磁界強度の角度である。磁気エネルギーは、ヒステリシスを無視すれば、積分の経路に寄らないため、磁界強度の接線成分および直角成分は次式で表される。

$$H_t = \frac{\partial F}{\partial B} \quad (10)$$

$$H_\theta = \frac{1}{B} \frac{\partial F}{\partial \theta_B} \quad (11)$$

ここで、(9) 式から求まる磁気エネルギーは、材料の磁気異方性が 90° 対称となることから、次式のように角度方向に対するフーリエ級数展開が可能であると仮定する。

$$F(B, \theta_B) = \sum_{k=0}^{N_f} f_k(B) \cos(2k\theta_B) \quad (12)$$

ここで、 N_f はフーリエ級数の次数 (= 角度方向の測定点数)、 f_k はフーリエ級数の各次数成分である。以上から、一次元的な磁気測定から、材料の磁気異方性の推定が可能となる。

そして、応力による磁気異方性も (8) 式から 90° 対

称となることは明白であるから、同様に推定できるとし、応力印加機構を持つ次元単板磁気試験器による磁気測定結果から、応力磁気異方性を推定する。

磁気異方性を考慮した二次元非線形磁界解析をニュートン・ラプソン法により解く場合、磁界強度と磁束密度との関係および、その微係数が必要となるが、Fig. 7に示す主応力座標を基準にすれば次式で示される。

$$H_{\sigma_1} = H_r \cos \theta_B - H_\theta \sin \theta_B \quad (13)$$

$$H_{\sigma_2} = H_r \sin \theta_B + H_\theta \cos \theta_B \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{\sigma_1}}{\partial B_{\sigma_1}} &= \frac{\partial H_r}{\partial B} \cos^2 \theta_B + \frac{\sin^2 \theta_B}{B} \left(H_r + \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta_B} \right) \\ &\quad - 2 \frac{\partial H_\theta}{\partial B} \cos \theta_B \sin \theta_B \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{\sigma_1}}{\partial B_{\sigma_2}} &= \left(\frac{\partial H_r}{\partial B} - \frac{H_r}{B} - \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta_B} \frac{1}{B} \right) \cos \theta_B \sin \theta_B \\ &\quad + \frac{\partial H_\theta}{\partial B} (\cos^2 \theta_B - \sin^2 \theta_B) = \frac{\partial H_{\sigma_2}}{\partial B_{\sigma_1}} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{\sigma_2}}{\partial B_{\sigma_2}} &= \frac{\partial H_r}{\partial B} \sin^2 \theta_B + \frac{\cos^2 \theta_B}{B} \left(H_r + \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta_B} \right) \\ &\quad + 2 \frac{\partial H_\theta}{\partial B} \cos \theta_B \sin \theta_B \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、主応力座標系は直交座標系と必ずしも一致しないことから、磁束密度ベクトル、磁界強度ベクトル、および磁界強度の微係数テンソルは、次式のように回転させることで求める。

$$\begin{bmatrix} B_x & H_x \\ B_y & H_y \end{bmatrix} = [\theta_{\text{bm}}] \begin{bmatrix} B_{\sigma_1} & H_{\sigma_1} \\ B_{\sigma_2} & H_{\sigma_2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial H_x}{\partial B_x} & \frac{\partial H_x}{\partial B_y} \\ \frac{\partial H_y}{\partial B_x} & \frac{\partial H_y}{\partial B_y} \end{bmatrix} = [\theta_{\text{bm}}]^T \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{\sigma_1}}{\partial B_{\sigma_1}} & \frac{\partial H_{\sigma_1}}{\partial B_{\sigma_2}} \\ \frac{\partial H_{\sigma_2}}{\partial B_{\sigma_1}} & \frac{\partial H_{\sigma_2}}{\partial B_{\sigma_2}} \end{bmatrix} [\theta_{\text{bm}}] \quad (19)$$

$$[\theta_{\text{bm}}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{bm}} & -\sin \theta_{\text{bm}} \\ \sin \theta_{\text{bm}} & \cos \theta_{\text{bm}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここで、 θ_{bm} は、主応力座標系と直交座標系の相対角度であり、(7) 式の右辺第 2 項に相当する。

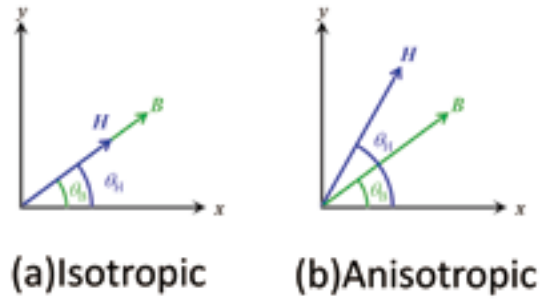


Fig. 5 Magnetic anisotropy

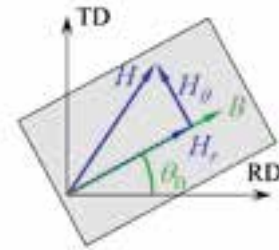


Fig. 6 Magnetic anisotropy on 1D-SST

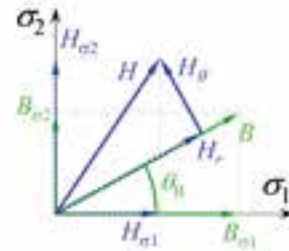


Fig. 7 Magnetic anisotropy by stress

3.4 応力磁気異方性を考慮した鉄損解析手法

一方、次元動磁界解析による鉄損計算で用いるヒステリシス特性は、前節で述べた磁気エネルギーが経路に寄らないことを前提とするモデル化が適用できない。そこで、以下のように応力磁気異方性を考慮する。偏磁の無い、定常状態におけるモータ内部を流れる磁束は、Fig. 1に示すようにティース先端などでは回転磁束となるため、応力場と磁化の相対的な関係は1周期の間に変化すると考えられる。そこで、Fig. 8に示すようなモータの磁界解析中の各要素の磁束密度ベクトル軌跡の長軸 B_l および短軸成分 B_s を記憶しておき、長軸および短軸が受ける応力成分を(8)式を用い、次式で求める。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{m}} &= \frac{1}{4} \left(\sigma_1 \{1 + 3 \cos 2(\theta_{\text{m}1} - \theta_{\text{bm}})\} \right. \\ &\quad \left. + \sigma_2 \{1 - 3 \cos 2(\theta_{\text{m}1} - \theta_{\text{bm}})\} \right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\sigma_{B_s} = \frac{1}{4} \left(\sigma_1 \{1 + 3 \cos 2(\theta_{B_s} - \theta_{B_m})\} + \sigma_2 \{1 - 3 \cos 2(\theta_{B_s} - \theta_{B_m})\} \right) \quad (22)$$

ここで、 σ_{B_l} は長軸方向の磁化が受ける応力、 σ_{B_s} は短軸方向の磁化が受ける応力、 θ_{B_l} は長軸方向の磁化の角度、 θ_{B_s} は短軸方向の磁化の角度である。このように求めた各軸の応力から、ヒステリシスが受ける応力 σ_{hys} を以下のように重みづけをして求める。

$$\sigma_{hys} = \frac{B_l \sigma_{B_l} + B_s \sigma_{B_s}}{B_l + B_s} \quad (23)$$

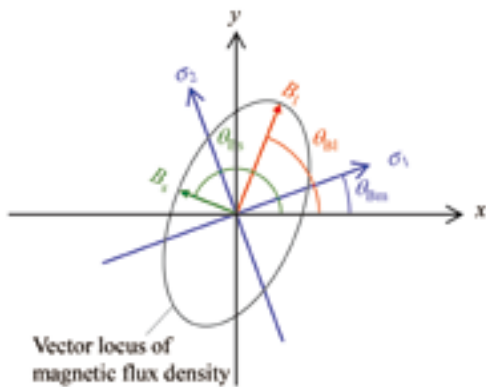


Fig. 8 Vector locus of magnetic flux density

3.5 一次元単板磁気試験器による測定結果

Fig. 9 および Fig. 10 に、弾性応力下および塑性ひずみ下における一次元単板磁気試験による磁気特性の測定結果を示す。弾性応力および塑性ひずみの付与方法、準直流磁気特性の推定方法は、文献4)と同様の方法および条件を用いた。なお、Fig. 10 中の塑性ひずみの値は、真ひずみの大きさを表す。

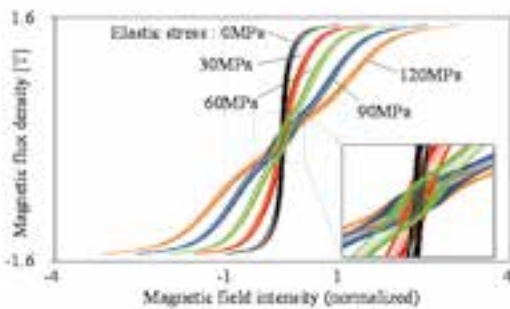


Fig. 9 Quasi-static magnetic hysteresis under elastic stress (Equivalent to JIS50A290)

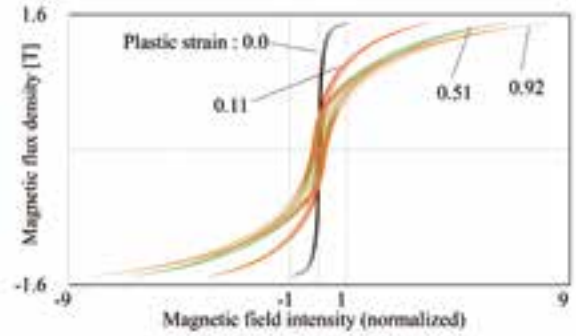


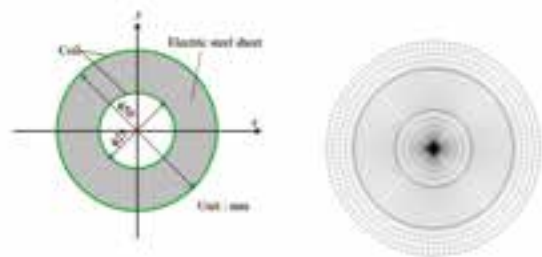
Fig. 10 Quasi-static magnetic hysteresis under plastic strain (Equivalent to JIS50A290)

4. 開発手法による応力磁気異方性の表現

ここでは、応力磁気異方性のモデル化手法を Fig. 11 (a) に示すトロイダルリングモデルに種々の応力を一様に負荷し、その表現能力を確認する。Fig. 11 (b) にメッシュモデルを、Table 1 に解析条件を示す。Fig. 12 に、(9) 式～(12) 式による応力磁気異方性を考慮した磁気特性の推定結果を示す。

Table 1 Analysis conditions.

Material	Equivalent to JIS50A290				
Exciting current [AT]	60				
Number of elements	2881				
Number of nodes	2880				
Stress [MPa]	No.	1	2	3	4
	σ_x	0	60	60	60
	σ_y	0	30	60	45
r	0	0	0	10	



(a) Analyzed model (b) Mesh model

Fig. 11 Analyzed model

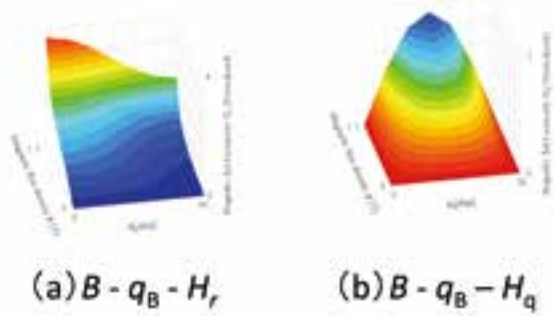


Fig. 12 Magnetic property with stress ($s_x = 60\text{MPa}$, $s_y = 30\text{MPa}$)

Fig. 13 に、磁束密度の計算結果を示す。(a) では、無応力状態であるため、当然ではあるが、周方向に均一な分布であり、異方性を生じていない。(b) では、応力によって異方性が生じ、磁束密度分布が周方向に対して不均一である。特に、径方向の磁束密度分布が、x 軸上では内径側に集中しているのに対し y 軸上ではほぼ均一である。これは、x 軸上では y 方向磁束となるため、 σ_B が 0MPa となるのに対し、y 軸上では x 方向磁束となるため 45MPa となる。このため、x 軸上では磁束の通りやすい内径側に磁束が集中したと考えられる。(c) では、磁束密度の周方向に均一な分布であり、異方性は生じていない。これは、等方的に応力の影響を受ける静水圧状態であるため、(8) 式から分かるように σ_B が磁束方向に寄らず 30MPa となるためと理解できる。(d) では、磁束密度分布の内径側への集中する箇所が周方向にずれていることが分かる。これは、(7) 式および (18) ~ (20) 式に示すように、せん断応力により主応力座標系が直交座標系からずれるためと理解できる。

以上から、前章で述べた応力磁気異方性のモデル化が意図したように表現できていることが分かる。

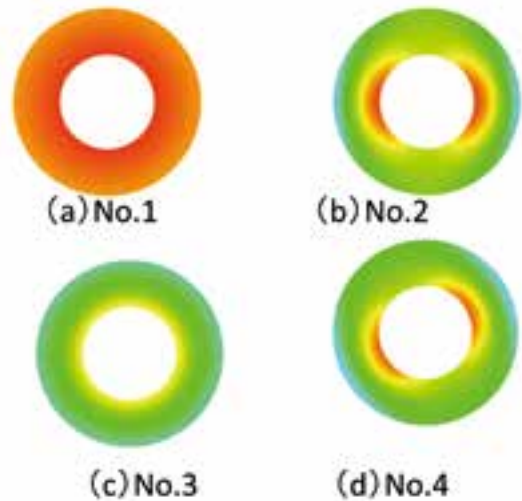


Fig. 13 Distribution of magnetic flux density

5. 開発手法によるモータ鉄損の計算

ここでは、開発手法を用い、打抜き加工ひずみが無負荷時のモータ鉄損に与える影響を検証する。Fig. 14 に解析モデル、Fig. 15 にメッシュモデル、Table 2 に解析条件を示す。2次元解析モデルは空間対称性を考慮し、1/10 モデルとした。Fig. 16 に打抜きひずみの与え方を示す。ひずみを与える範囲は、ステータコアの周囲の端面から 0.5mm の範囲とし、その中を 0.1mm ピッチで 5 等分にプロパティを分割する。塑性ひずみ、および残留応力の条件を Table 3 に示す。ここで、表中の σ_1 および σ_2 は、残留応力の主応力を表し、それぞれ打抜き端面に対し直角方向と平行方向とする。

Table 2 Analysis conditions

Material	Stator core	Equivalent to JIS50A290
	Rotor core	
Magnet	$B[\text{T}]$	0.8
	$H_c[\text{kA/m}]$	637
Thickness [mm]		10
Rotational Speed [min^{-1}]		300
Number of elements		11788
Number of nodes		11780
Number of time steps		180

Table 3 Strain and stress conditions

No.	Plastic strain	Elastic strain	
		σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]
1	0.94		
2	0.20		
3		31.6	57.4
4		14.1	28.2
5		3.80	7.70

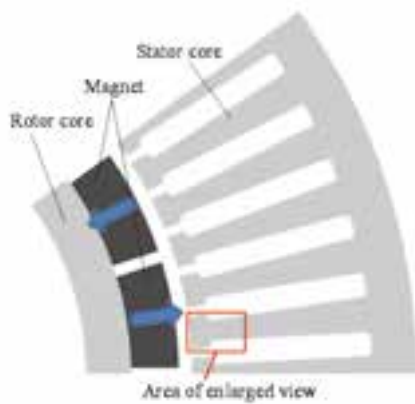


Fig. 14 Analyzed model

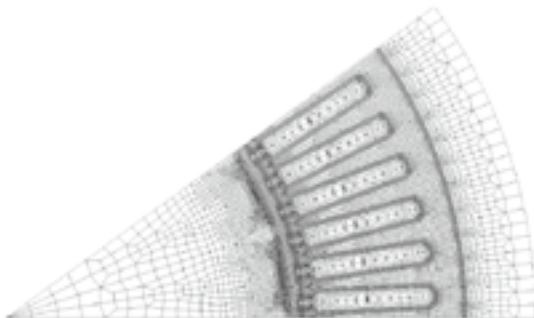


Fig. 15 Mesh model

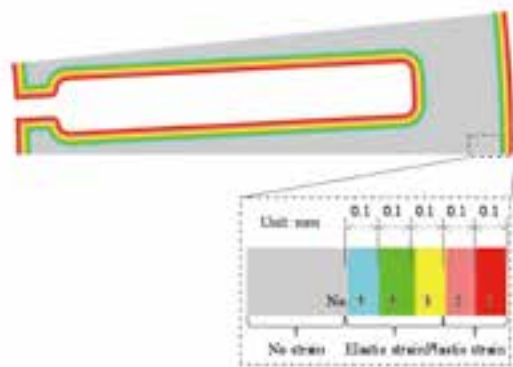


Fig. 16 Mesh model

Fig. 17 に、1 時間ステップ目の磁束密度分布図を示す。スロット根元部において、無ひずみの場合は幅方向に均一な磁束密度分布となっているのに比べ、打抜きひずみを考慮した場合には、塑性ひずみおよび残留応力の領域で磁束密度が低下しており、無ひずみの領域で磁束密度が集中していることが分かる。これは、塑性ひずみでは磁気抵抗が大きいことに加え、残留応力部では、磁化の方向が圧縮応力の最大となる方向のため、磁気抵抗が大きくなるためと考えられる。

紙面中央のティース先端部において、無ひずみの場合は磁石磁束が、ティース表面を通過して N 極から S 極へ渡って短絡しているに比べ、打抜きひずみを考慮した場合には、角部から磁束が渡り、表面からやや内部を通過しているのが分かる。これは、ティース表面は塑性ひずみであり、ティース表面の平行方向の残留応力は圧縮応力が大となるため、ティース表面と平行方向は磁気抵抗が大きくなる。そのため、ティース角部から磁束が渡り、無ひずみ部をティース端面と平行に通っていくと考えられる。

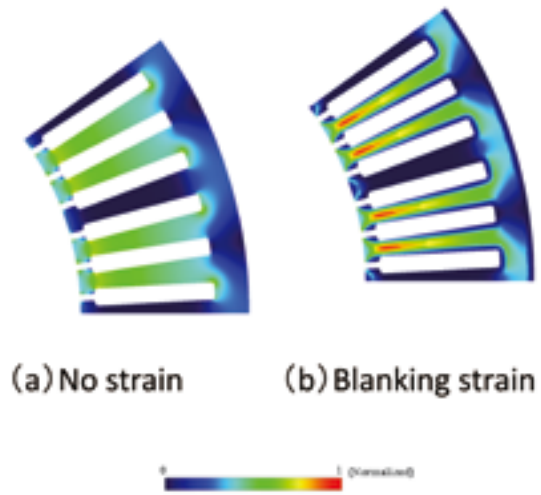


Fig. 17 Distribution of magnetic flux density (Time step = 1)

Fig. 18 に、Fig. 14 に示すティース先端部を拡大表示した部分の磁束密度ベクトルを示す。無ひずみの場合、ティース表面から渡った磁石磁束はティースに沿って流れている。これに対し、打抜きひずみを考慮した場合、ティース表面から渡った磁石磁束は、残留応力部において、磁気抵抗が小さくなるよう、ティース角部から中央の無歪部へ向かう斜め 45 度方向に集中

モータ

し、流れている様子が分かる。

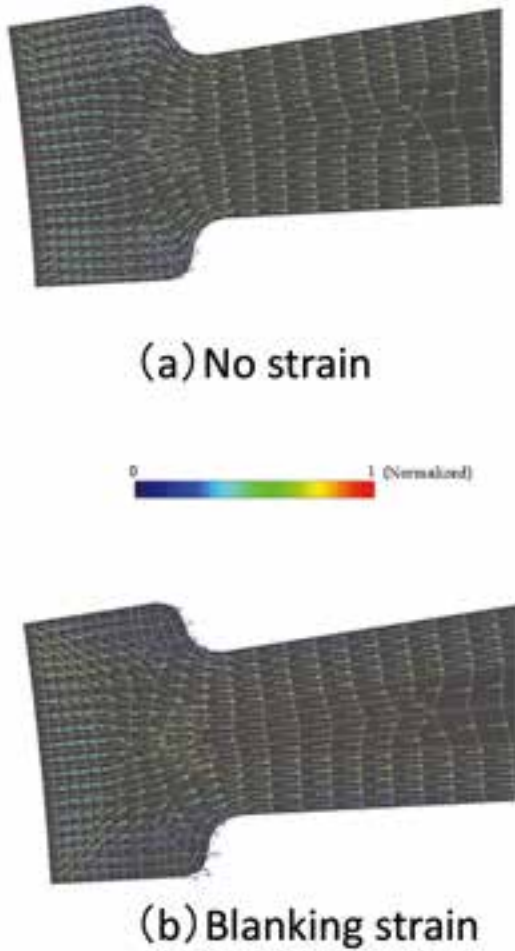


Fig. 18 Vector of magnetic flux density (Time step = 1)

Fig. 19 に、(21) 式～(23) 式より求めたヒステリシスが受ける応力の分布を示す。なお鉄損計算では、空間対称性を考慮し、1 ティース分のみを対象とする。ティース中央部など、磁束が打抜き端面と平行に流れる部位で、影響を受ける応力が大きく、ティース先端などの磁束が打抜き端面に対して角度を持つ部位では、応力が小さくなっている。

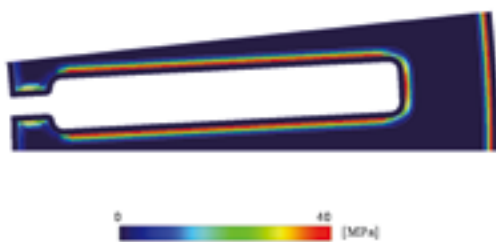


Fig. 19 Distribution of stress

Fig. 20 に、ヒステリシス損分布の計算結果を示す。ティース先端部では、塑性ひずみ部に磁石磁束が通るため、損失が高い。またティース先端角部では、Fig. 18 で示したように応力磁気異方性により磁束が集中するため損失密度がやや高いと考えられる。また、スロット根元部は、Fig. 17 で示したように応力磁気異方性により、塑性ひずみ部に磁束が流れるため、損失密度が高いと考えられる。

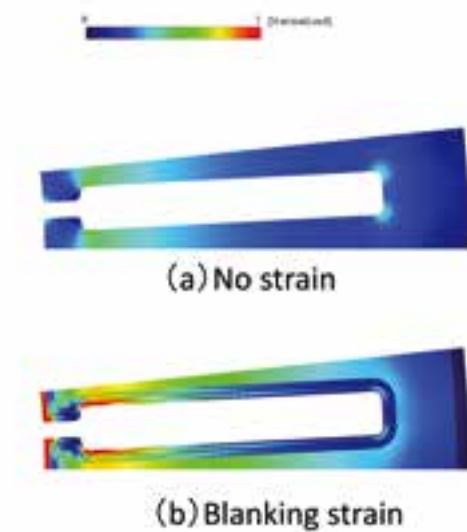


Fig. 20 Distribution of hysteresis loss

Fig. 21 に、渦電流損分布の計算結果を示す。打抜きひずみを考慮した場合、無ひずみの場合に比べて、ティース先端角部およびティース中央部等の、応力磁気異方性により磁束密度の集中部において損失密度が高いことが分かる。

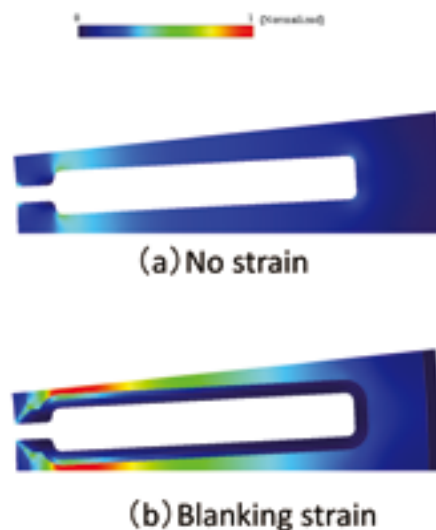


Fig. 21 Distribution of eddy current loss

Fig. 22 に、鉄損の計算結果を示す。渦電流損およびヒステリシス損は、約 50% 程度増加しており、影響が大きいことが分かる。渦電流損が増加する理由は、打抜きひずみにより無ひずみ部に磁束が集中したためと考えられる。

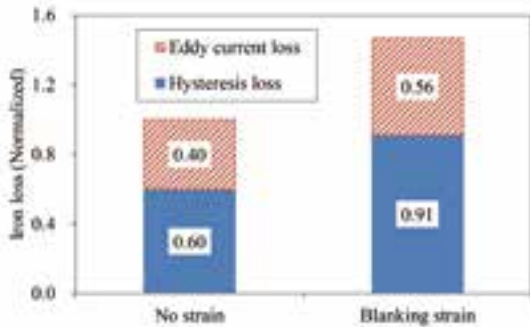


Fig. 22 Computation results of iron loss

6. 結論

加工残留応力による磁気異方性を考慮した鉄損解析手法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 応力による磁気異方性は、磁化が各方向において受ける応力の変化によって生じるとし、その変化が主応力座標系を基準とする正弦波としてモデル化を行った。
- (2) 応力磁気異方性を考慮した磁気特性は、一次元単板磁気特性試験結果から材料の磁気異方性を推定する手法を基礎とし、一次元の応力-磁気特性の測定結果から推定した。
- (3) リングテストピースを用い、開発手法の表現能力を確認した結果、磁束密度分布図より意図した応力磁気異方性が再現可能であることが認められた。
- (4) 提案手法をモータモデルに適用した結果、無ひずみ状態に対して打抜きひずみを考慮した場合、鉄損は 50% 程度の増加が確認された。特にヒステリシス損の増加は、残留応力による磁気異方性によって、磁束集中や塑性ひずみ部に磁束が流れる原因となり、結果として損失密度が大きく上昇することが明らかとなった。

開発手法により、加工ひずみがモータ鉄損に与える影響を詳細に分析できるようになったことから、今後

モータの小型・高効率化が必要となる、磁気回路構造・製造工程・鉄芯材料の最適化設計を行っていく予定である。

参考文献

- 1) M. Nakano, C. Fujino, Y. Tani, A. Daikoku, Y. Toide, Y. Shinichi, H. Arita, and T. Toshioka, "High-precision Calculation of Iron loss by Considering Stress Distribution of Magnetic Core," IEE Japan Trans. IA, vol. 129, no. 11, pp. 1060-1067 (2009) (in Japanese).
中野正嗣・藤野千代・谷良浩・大穀晃裕・都出結花利・山口信一・有田秀哲・吉岡孝：「鉄心内部の応力分布を考慮した高精度鉄損解析手法」, 電学論 D, vol. 129-D, no. 11, pp. 1060-1067 (2009)
- 2) Y. Kai, and M. Enokizono, "Vector Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steel Sheet under Principal Stress," Journal of JSAEM, vol. 22, no. 2, pp. 300-305 (2014) (in Japanese)
甲斐祐一郎・榎園正人：「主応力下における無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性」, 日本 AEM 学会誌, vol. 22, no. 2, pp. 300-305 (2014)
- 3) Y. Kai, Name, and M. Enokizono, "Measurement of Vector Property under Stress and Its Application for Electrical Machine Design," Journal of JSAEM, vol. 21, no. 4, pp. 554-559 (2013) (in Japanese)
甲斐祐一郎・榎園正人：「応力ベクトル磁気特性測定と機器設計への応用」, 日本 AEM 学会誌, vol. 21, no. 4, pp. 554-559 (2013)
- 4) S. Doi, T. Aoki, K. Okazaki, Y. Takahashi, and K. Fujiwara, "Study of Precise Computation Method of Magnetic Loss Considering Blanking Press Strain," IEE Japan Tans. PE, vol. 137, no. 3, pp. 254-260 (2017) (in Japanese).
土井智史・青木哲也・岡崎恵一・高橋康人・藤原耕二：「打抜き歪を考慮した高精度モータ鉄損解析手法の基礎的検討」, 電学論 B, vol. 137, no. 3, pp. 254-260 (2017)
- 5) T. Matsuo and M. Shimasaki, "Two Types of Isotropic Vector Play Models and Their Rotational Hysteresis Losses," IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 898-901 (2008).
- 6) K. Yamazaki and N. Fukushima, "Iron Loss Model for Rotating Machines Using Direct Eddy Current Analysis in Electrical Steel Sheets," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 25, no. 3, pp. 633-641 (2010).
- 7) Y. Takeda, Y. Takahashi, K. Fujiwara, A. Ahagon, and T. Matsuo, "Iron Loss Estimation Method for Rotating Machines Taking Account of Hysteretic Property," IEEE Trans. Magn., vol. 5, no. 3, 7300504 (2015).
- 8) 近角聡信：「強磁性体の物理 (下)」, 裳華房 (1978)
- 9) S. Higuchi, Y. Takahashi, T. Tokumasu, k. Fujiwara, Y. Ishihara, "Modeling of 2-D Magnetic Property Based on 1-D Measurements," The Papers of Joint Technical Meeting on

Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-11-67, RM-11-80 (2011) (in Japanese)

樋口真伍・高橋康人・徳増正・藤原耕二・石原好之：「一次元的な磁気特性の評価に基づく二次元磁気特性モデリング」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-11-67, RM-11-80 (2011)

- 10) S. Higuchi, T. Nakao, Y. Takahashi, T. Tokumasu, k. Fujiwara, Y. Ishihara, "Modeling of 2-D Magnetic Property Based on 1-D Measurements (2)," , The Papers of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-12-5, RM-12-5 (2012) (in Japanese)

樋口真伍・中尾友則・高橋康人・徳増正・藤原耕二・石原好之：「一次元的な磁気特性の評価に基づく二次元磁気特性モデリング (その2)」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-12-5, RM-12-5 (2012)

- 11) S. Higuchi, Y. Takahashi, T. Tokumasu, k. Fujiwara, "Modeling of 2-D Magnetic Property Based on 1-D Measurements (Pt.3)," , The Papers of Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEE Japan, SA-12-112, RM-12-127 (2012) (in Japanese)

樋口真伍・高橋康人・徳増正・藤原耕二：「一次元的な磁気特性の評価に基づく二次元磁気特性モデリング (その3)」, 電気学会静止器・回転機合同研究会, SA-12-112, RM-12-127 (2012)

著者



土井 智史

どい さとし

材料技術部 博士(工学)
軟磁性材料に関する研究開発に従事



藤原 耕二

ふじわら こうじ

同志社大学 理工学部 教授
主として、有限要素法による非線形および渦電流を考慮した三次元磁界解析法、ならびに磁性材料の標準磁気特性測定法に関する研究に従事



高橋 康人

たかはし やすひと

同志社大学 理工学部 准教授
主として、電磁界の高速大規模数値計算技術、磁性材料の磁気特性モデリング、太陽光発電システムに関する研究に従事



岡崎 恵一

おかざき けいいち

生産技術研究開発部
電動化対応材料・加工技術開発のプロジェクトリーダー



青木 哲也

あおき てつや

材料技術部
主軟磁性材料、硬磁性材料、磁気回路構造に関する研究開発に従事