

鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮した モータ磁気設計技術

山口信一* 田中敏則*
大穀晃裕** 藤野千代***
谷 良浩*

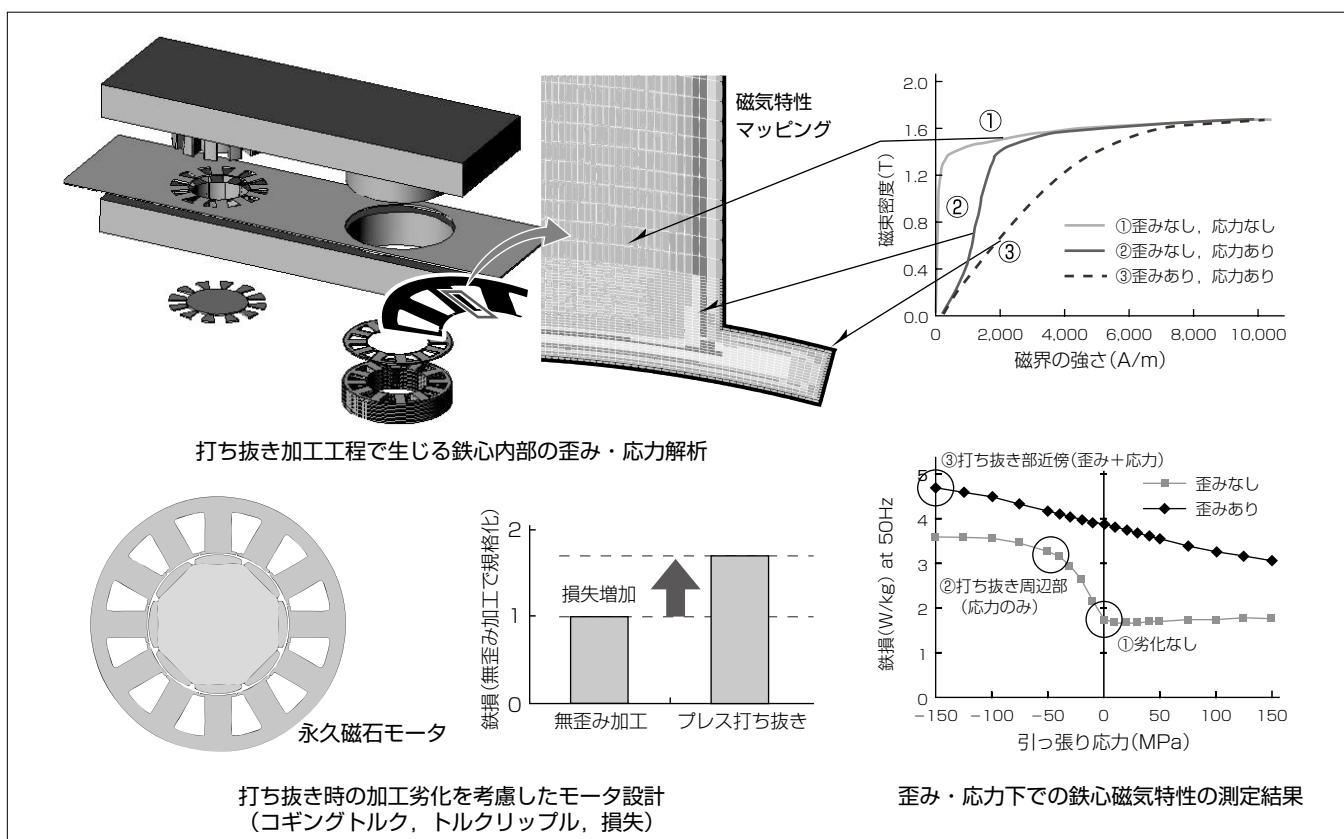
Motor Design Technologies Considering Deteriorated Magnetic Properties in Magnetic Core Due to Stamping
Shinichi Yamaguchi, Akihiro Daikoku, Yoshihiro Tani, Toshinori Tanaka, Chiyo Fujino

要 旨

近年、地球環境保護の観点から機器の省エネルギー・省資源化が進み、モータ開発でも低損失・小型化を追求した設計が求められている。低損失・小型化を追求したモータ設計を行うためには、量産時のモータ鉄心の磁気特性を正確に把握することが重要となる。

モータ量産時には、鉄心を電磁鋼板からプレス打ち抜きによって製作するのが一般的である。打ち抜きによって切断面近傍の鉄心素材には歪(ひず)み加わるとともに、広範囲にわたって応力が残留し、これらの影響によってモータ鉄心の磁気特性は歪みや応力がない状態に比べ劣化することが知られているが、従来はこの磁気特性劣化がモータ性能に与える影響を定量的に把握できなかった。

本稿では、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に把握することを目的として開発した解析技術について述べる。この解析技術は、歪み及び応力を変化させた際の鉄心磁気特性のデータベースをあらかじめ作成し、打ち抜き解析結果に基づいて鉄心内部の磁気特性劣化をマッピングし、磁界解析でモータ特性を予測するものである。永久磁石モータを例として、鉄心打ち抜きによる加工劣化の影響を定量化した。この技術を用いることで、量産時の鉄心の磁気特性劣化を考慮した高精度な性能予測が可能となる。今後、設計技術の妥当性検証を行うとともに三菱電機モータの高性能化開発に役立てていく。



鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮した設計技術

歪み及び応力を変化させた場合の鉄心磁気特性のデータベースを取得し、打ち抜き解析結果に基づいて鉄心内部の磁気特性劣化をマッピングし、磁界解析を行うことで、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に予測する。

1. ま え が き

近年、地球環境保護の観点から機器の省エネルギー・省資源化が進み、モータ開発でも低損失・小型を満足する高性能化設計が求められている。モータの高性能化設計を行うためには、量産時のモータ鉄心の磁気特性を正確に把握することが重要となる。当社はこれまでに、鉄心の磁気異方性や焼きばめ時の応力を考慮した設計技術の開発を行ってきた⁽¹⁾⁽²⁾。一方、産業機器、エレベーター、家電などの小型モータを量産する際には、鉄心を電磁鋼板からプレス打ち抜きによって製作するのが一般的である。打ち抜きによって切断面近傍の鉄心素材には歪み加わるとともに、広範囲にわたって応力が残留し、これらの影響によってモータ鉄心の磁気特性は歪みや応力がない状態に比べ劣化することが知られているが⁽³⁾、従来はこの磁気特性劣化がモータ性能に与える影響を定量的に把握できなかった。

本稿では、打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響を設計段階で高精度に把握することを目的として開発した解析技術について述べ、永久磁石モータを例にその解析結果について述べる。

2. 打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ設計

2.1 解析手法

今回開発した、打ち抜きによる加工劣化を考慮した解析システムのフローを図1に示す。解析システムは次の4項

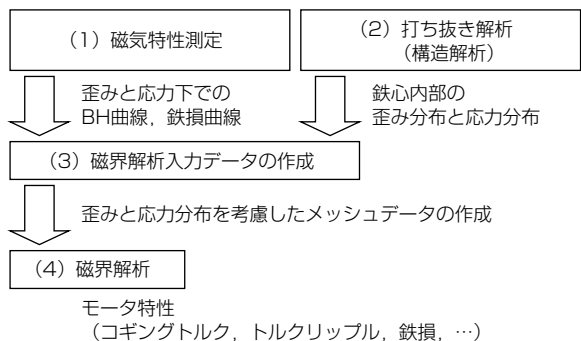


図1. 歪みと応力を考慮した解析システムのフロー

目で構成されている。

- (1) 歪み及び応力を付与した鉄心素材の磁気特性を歪み量及び応力値に対して測定し、データベースを作成する。
- (2) モータ鉄心の打ち抜き解析を行い、打ち抜き後の鉄心内部の歪み量及び応力値を算出する。
- (3) 鉄心の磁気特性データベースと打ち抜き解析結果を基に、磁界解析用の入力データを作成する。具体的には、磁界解析に用いるメッシュデータの各要素位置での歪み量及び応力値を(2)の解析結果から読み取り、この値が(1)で測定したデータのいずれに分類されるかを判定し物性番号として分類する。
- (4) これらで作成したメッシュデータに対し、物性番号とBH特性曲線とを対応させ磁界解析を実施する。応力値には金属材料の評価に適したミーゼス相当応力を用いる。

2.2 歪み・応力印加時の電磁鋼板の磁気特性⁽⁴⁾

歪み及び応力印加時の電磁鋼板の磁気特性を測定するため、図2に示す大型の引っ張り試験片に引っ張り加工を施し0~15%の歪みを付加した。磁気特性測定を行う磁気試験片は、図2の引っ張り試験片の中央部をワイヤカット切断し製作した。磁気測定は、応力印加機構付きシングルヨーク・2Hコイル方式の単板磁気試験器を用いて行った。図3に歪み及び応力印加時の磁気特性測定結果の一例を示す。図3(a)は塑性歪み0%及び5%時の圧縮応力下でのBH曲線であり、図3(b)は印加応力に対する比透磁率(磁束密度: 1 T)を示したものであり、図3(c)は印加応力に対する鉄損(磁束密度: 1 T)を示したものである。測定結果から、歪みや応力のない状態では比透磁率は高い値を示す

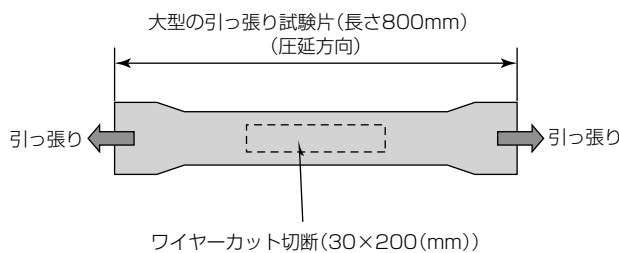
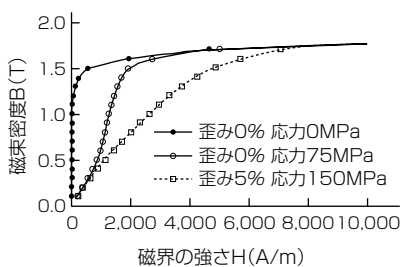
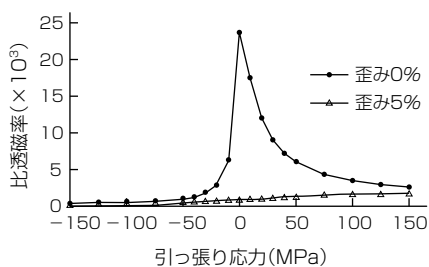


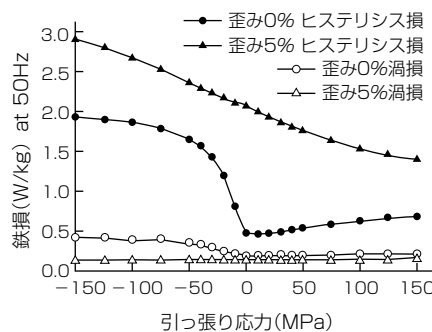
図2. 歪み付与磁気試験片の作製法



(a) BH曲線



(b) 歪み・応力-比透磁率曲線 (磁束密度: 1 T)



(c) 歪み・応力-鉄損曲線 (磁束密度: 1 T)

図3. 歪みと応力下での電磁鋼板の磁気特性

が、歪みや応力が印加されると比透磁率が低下することが分かる。また、引っ張り応力と圧縮応力では比透磁率の変化が異なる。特に歪みがない場合、圧縮時には引っ張り時よりも急峻(きゅうしゅん)に比透磁率が低下する。図3(c)より、歪みや応力はヒステリシス損への影響が大きく、歪み量や圧縮応力の増加に伴い、損失も増加していることが分かる。

3. 検証用モータと解析結果

3.1 検証用モータの諸元⁽⁵⁾

開発した解析技術を用いて打ち抜き加工がモータ特性に及ぼす影響について検討を行う。図4に検証用モータの断面図を示す。検証用モータは極数8、スロット数12の永久磁石モータとし、その他の諸元を表1に示す。本稿では、打ち抜き加工が永久磁石モータの基本性能であるコギングトルクと無負荷鉄損に与える影響について検討する。

3.2 打ち抜き解析

打ち抜き解析は構造解析を用いて行う。本稿では、図5に示すように、電磁鋼板から2ステップで固定子鉄心を打ち抜くことを想定した。図6に構造解析による打ち抜き解析の結果を示す。図6は、解析結果の対称性を考慮し半テ

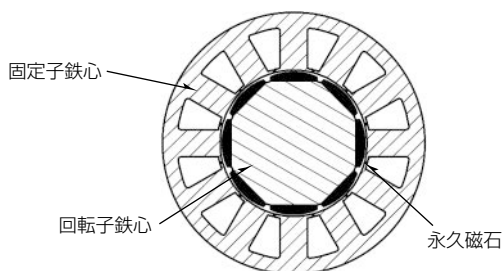


図4. 検証用モータの断面図

表1. 検証用モータの諸元

極数	8
スロット数	12
回転子鉄心材料	S45C (JIS G4051)
固定子鉄心材料	35A230 (JIS C2552)
回転子外径(mm)	40
固定子外径(mm)	80
鉄心幅(mm)	45
エアギャップ長(mm)	0.4
永久磁石の残留磁束密度(T)	0.5, 1.0, 1.4

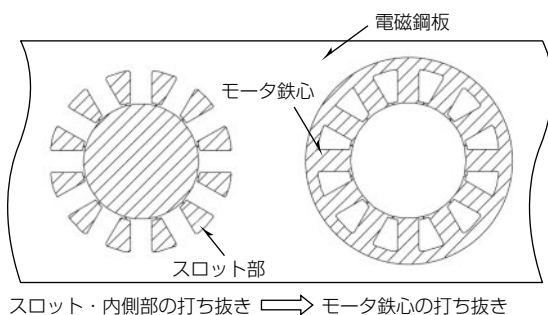


図5. 電磁鋼板からの打ち抜き方法

ィース分のみを示している。図6(a)及び図6(b)はティース全体及びティース先端部の応力分布のコンター図であり、図6(c)はティース中央部Aにおける切断部からの距離に対する歪み量と応力値を示した図である。解析結果より、切断部近傍での歪みや応力が大きくなっており、電磁鋼板の厚さのおよそ1/2の範囲に分布していることが分かる。

3.3 磁界解析用データの作成

打ち抜き解析結果を用い、歪み及び応力を反映させた磁界解析用のメッシュを図7に示す。モデル中の各要素の濃淡は物性番号の違いを表し、歪み量や応力値に応じてそれぞれ異なる磁気特性が割り当てられている。

3.4 打ち抜きによる加工劣化を考慮した磁界解析

図8に図7のメッシュデータと図3の歪み量及び応力値に対する磁気特性測定データを用い、磁界解析でコギングトルクを算出した結果を示す。図8(a)は磁石の残留磁束密度を1.4Tとした場合のコギングトルク波形であり、図8(b)は磁石の残留磁束密度を変化させた場合のコギングトルク

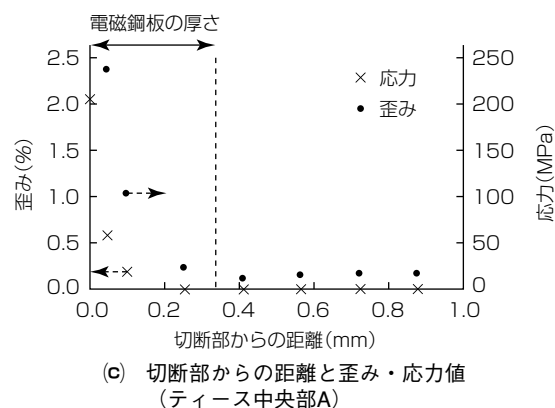
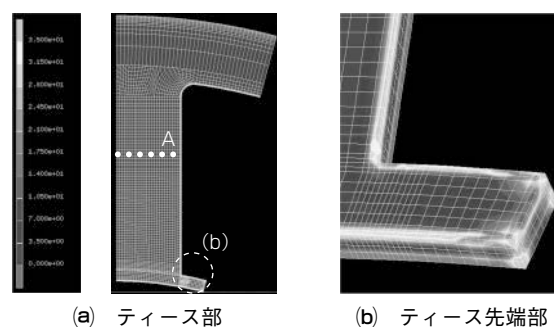


図6. 構造解析による応力分布解析結果

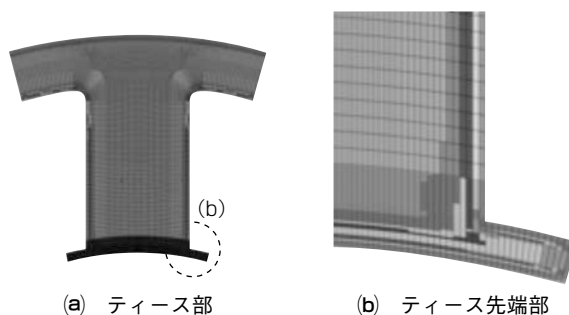
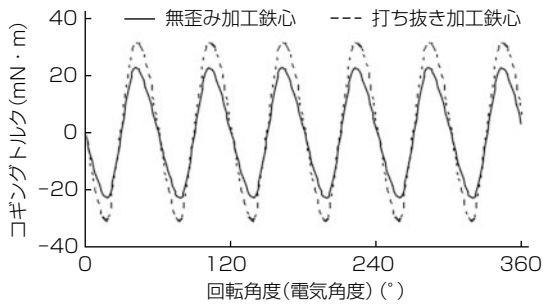
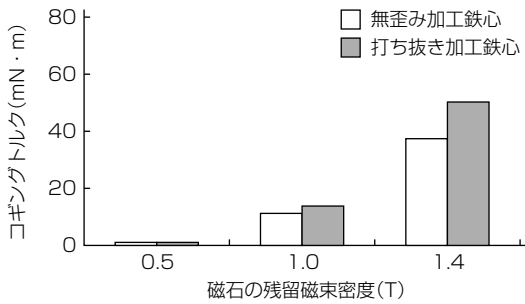


図7. 歪みと応力分布を反映した磁界解析用のメッシュ

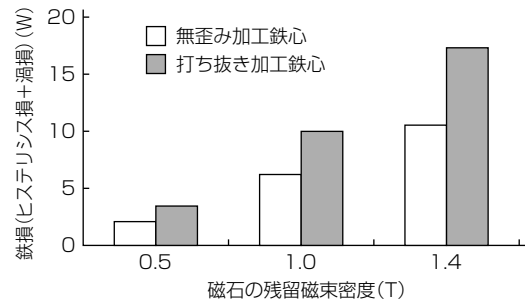


(a) コギングトルク波形(磁石の残留磁束密度1.4T)

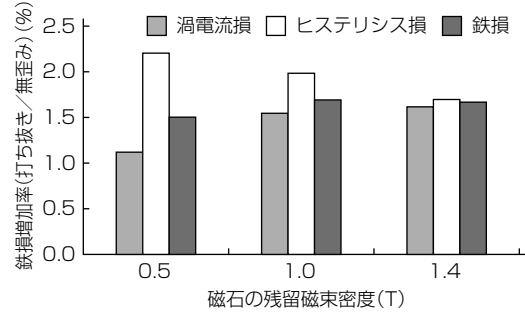


(b) コギングトルクの振幅

図8. 打ち抜きを考慮したコギングトルク解析結果



(a) 鉄損解析結果



(b) 渦電流損及びヒステリシス損の増加率

図9. 打ち抜き時の加工劣化を考慮した鉄損解析結果

の振幅値を示した図である。また、図8には歪み及び応力がない状態でのコギングトルク波形と振幅値も示した。図8より、打ち抜きによって発生する歪みや応力の影響を考慮することでコギングトルクが変化していることが分かる。このコギングトルクの変化量は磁石の残留磁束密度が大きくなるに伴い増加している。これは、磁石の残留磁束密度の大きさの変化によって、鉄心内部の磁気飽和の状態が変化しギャップ部の磁束密度が変化するためと考えられる。

次に鉄損解析について述べる。鉄損 W は、渦電流損 W_e とヒステリシス損 W_h の全メッシュ要素での和で表されるため⁽²⁾、次式となる。

$$W = W_e + W_h$$

$$= \sum_m \{ K_e(\varepsilon, \sigma) B^{\alpha(\varepsilon, \sigma)} f^{\gamma(\varepsilon, \sigma)} + K_h(\varepsilon, \sigma) B^{\beta(\varepsilon, \sigma)} f \} \rho \dots (1)$$

ここで、 K_e 、 K_h 、 α 、 β 、 γ は歪み量 ε 、応力値 σ の関数であり、図3の鉄損測定データより同定を行った。 f は周波数、 ρ は電磁鋼板の密度、 m はメッシュの要素番号を示している。図9に鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮した鉄損解析結果を示す。図9(a)には無負荷・3,000r/min時の鉄損を、図9(b)には打ち抜き加工による鉄損の増加率を示した。図9より、打ち抜きの影響によって鉄損はおおよそ1.6倍に増加している。また、磁石の残留磁束密度の増加に伴い、渦電流損増加率は大きくなり、ヒステリシス損増加率は小さくなっていることが分かる。これは打ち抜きによって鉄心内部の磁束密度分布が変化したためと考えられる。

4. む す び

鉄心打ち抜き時の加工劣化を考慮したモータ設計技術について述べ、永久磁石モータを例として打ち抜き加工がコ

ギングトルクと鉄損に与える影響の定量化を検討した。この技術を用いることで、量産時の鉄心の磁気特性劣化を考慮した高精度な性能予測が可能となる。今後、設計技術の妥当性検証を行うとともに当社製モータの高性能化開発に役立てていく。

この研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から委託された“次世代自動車用高性能モータ蓄電パワーエレシステムの研究開発”で行われたものである。

参 考 文 献

- (1) 大穀晃裕, ほか: 鉄心の詳細な磁気特性を考慮したモータ設計技術, 三菱電機技報, 79, No.11, 703~706 (2005)
- (2) 中野正嗣, ほか: 鉄心内部の応力分布を考慮した高精度鉄損解析手法, 電気学会論文誌D, 129, No.11, 1060~1067 (2009)
- (3) 柏原義之, ほか: 電磁鋼板の打抜きによる磁気特性劣化量の推定技術の開発, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-07-57, 19~24 (2007)
- (4) 谷 良浩, ほか: 弾塑性歪みが無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-42 (2009)
- (5) Yamaguchi, S., et al.: Accurate Magnetic Field Analysis for Estimating Motor Characteristics Taking Account of Elasto-Plastic Deformation in the Magnetic Core, COMPUMAG (2009)