

特別寄稿 特性評価技術と新しいモータの世界*

Design and Performance Evaluation of Electric Motors

名古屋工業大学 学長
松井 信行
Nobuyuki MATSUI

1. はじめに

モータの歴史は1800年代初頭にさかのぼり、そのためあって銅線と鉄心で構成される電気エネルギーから機械エネルギーへの変換機であるモータからはハイテクのイメージが浮かびにくい。しかし、モータは確実に進歩してきており、現在の情報化社会や環境対応型社会を支える基盤技術である。本稿では近年のモータの動向を筆者の周辺から説き明かし、背後に計測技術を基にした特性評価技術が大きな役割を演じていることを明らかにしたい。

Fig. 1 に示すように、ごく最近までモータビジネスは一種のマトリックス展開をしてきた。例えば、横軸に容量、縦軸に種別をとったマトリックスにおいて、自社のモータやドライバがどれだけカバーできているか競うという形のビジネス展開である。しかし、私たちはこのマトリックスビジネス展開から、ユーザの個別の要求に対してモータの構造と特性を特化させたモータの開発こそが今後強く求められ、そのためには試作を伴わない計算機援用設計手法の開発が肝要であるとして、1995年以來、特定用途に要求される特性実現のためにモータの構造と制御を一体として応える「用途指向形モータ」の概念¹⁾を提唱してきている。それ以來、進歩しつつある材料特性を勘案しつつ独自の全面的なコンピュータ援用設計のもとで、具体的なモータと駆動回路として多くの実現例を示してきた。コンピュータを援用した電磁設計においては、有限要素磁場解析(以下、FEM)を用いることもできるが、Fig. 2のように直線と円弧の組み合わせで最短磁路を設定する仮定磁路法をベースとしたモータ磁気回路解析を開発することで、大幅な計算時間の短縮を実現して、モータ形状、制御、回路動作の三者を融合した最適化が進められるようになった²⁾³⁾。

その具体例を、開発の狙い、要求の実現方法・成果とともに紹介したい。

2. 永久磁石モータの例

2.1 車両駆動用低速大トルクPMモータ⁴⁾

このモータの開発の狙いは、与えられた体格下で単

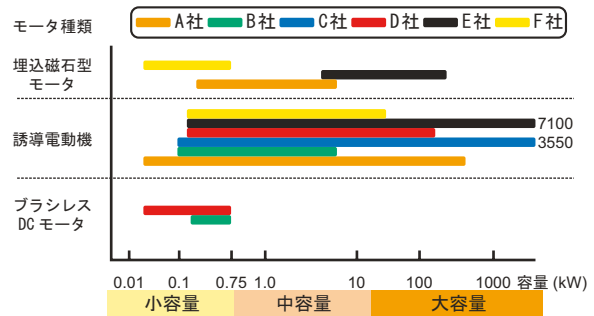
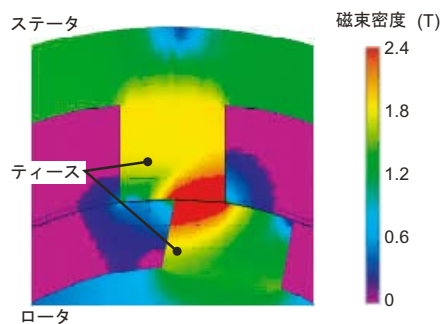
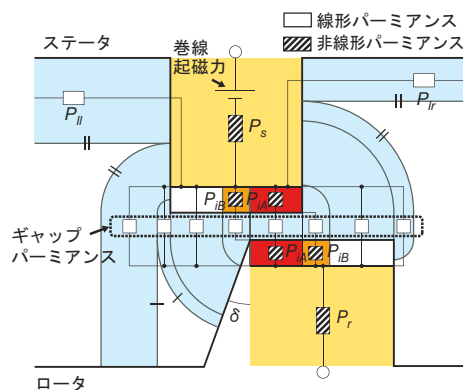


Fig. 1 モータのマトリックスビジネス展開



(a) FEMで得られた磁束密度コンター図



(b) 磁気等価回路モデル

Fig. 2 仮定磁路法に基づく非線形磁気回路モデル

位質量あたりのトルク値を、従来品に比べて格段に向上させる点にある。具体的には従来の市販サーボモータのカタログ記載のトルク密度は一般に7.0 Nm/kg程度に対して、10 Nm/kg以上の大トルク化の実現を目指し、軽量化の極限設計を行うことにある。

* 2008年2月15日 原稿受理

実現方法については、モータの設計段階で空隙部でのトルク発生状況に係る電磁気的現象を視覚的に捉えたモータ設計を実現するため、磁束線傾角という新たな概念に基づく簡便なトルク計算法を提案した。

この提案法を用いて、トルク発生に寄与しない、あるいは負トルクに寄与していた空隙磁束を弱め、正トルクに寄与する空隙磁束を高めることのできる巻線構造と固定子及び回転子構造設計を実現した。

結果としては、種々の計算機実験による検討の結論として、要求を満たす低速大トルクモータとして Fig. 3 に示す構造の 8 極 9 コイル形永久磁石モータを設計した。この設計に基づく試作モータによる実験によって、Fig. 4 に示すように 12.1 Nm/kg という数値を達成できたことを確認した。

2.2 工作機械送り軸用高速 PM サーボモータ⁵⁾⁶⁾

このモータの開発の狙いは、工作機械の X-Y 軸の水平軸早送り速度を従来の 30 m/min から 60 ~ 90 m/min へと高速化するための高速化対応型高効率 PM サーボモータにある。ワークの多面加工などにおける高速の送り作業を実現させたいことからの要求でもある。

高速モータの実現にあたっては、固定子ティースにおける磁気的な飽和に起因する鉄損の増大という問題を避けるために、Fig. 5 に示すようにスロットレス構造の PM モータの可能性を検討した。この場合、スロットレス構造のために巻線インダクタンスの値が極めて小さくなり、従来の PWM キャリア周波数では高次の電流高潮波成分が増大し、キャリア損失による発熱や効率低下が問題になった。参考文献 5) に詳説している方法でキャリア損の物理的発生箇所と要因を特定して新たな損失評価法を提案すると共に、その評価精度を確認して設計に導入した。

結果的には、高速回転用途に対する高効率スロットレス PM モータの設計手法を確立することができた。

2.3 48 V 直流電源車両用モータ⁷⁾

この開発の狙いは、基本的には 48 V 直流電源で動作する車両駆動用モータについて、広範なトルク速度レンジを持つモータの電磁構造の決定とその設計法の確立にある。これによって、従来品で個別配置されていたモータ、減速機、デファレンシャルギア、ブレーキ、車軸を一体化して、駆動系の大幅な小型化と軽量化を実現できる。

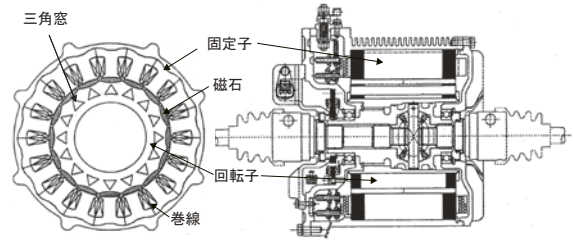


Fig. 3 開発モータの断面構造

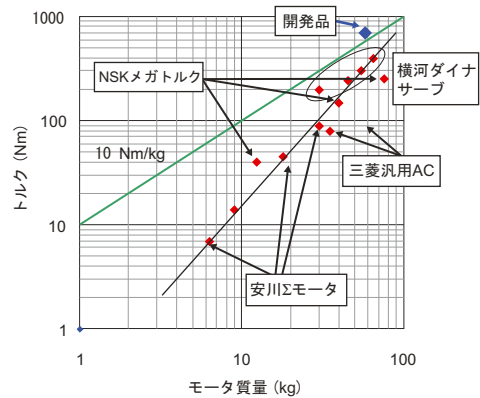


Fig. 4 開発モータのトルク・質量分布の位置づけ

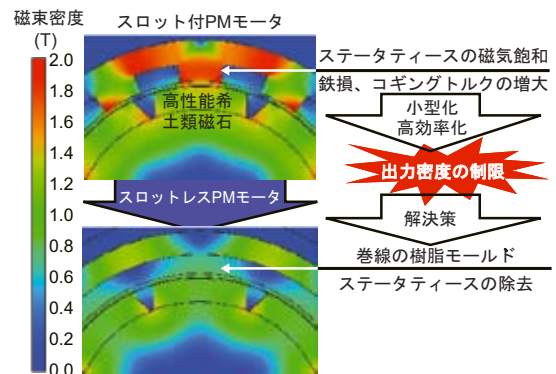


Fig. 5 スロットレス PM モータ

具体的な実現方法として、磁石を回転子内部に埋め込んだ埋込磁石モータと弱め界磁制御の組合せを検討した。その際、駆動系の構造から決まるモータの制約寸法、電源条件のもとで、要求される複数の代表動作点で運転可能なモータ定数範囲を求め、諸制限下でのモータの成立性をあらかじめ明らかにしてから、設計仕様を目標とするモータ定数になるように構造を決定する方法を確立した。この方法は従来法とは逆の手順で実施する新しい概念の用途指向型モータの設計法として注目に値する。

この設計手法によって、結果的には Fig. 6 に示すようなモータを試作できたが、そこでは、

- (1) 設計の初期段階でモータの成立性が判断でき、無駄な設計作業を省くことができ、設計時間を大幅短縮できた。
- (2) 車両用モータに提案法を適用し、小形化ビルトイン化を実現。体積比 40% を達成することができた。

2.4 要求特性の背反問題の解消⁹⁾

車両駆動用 PM モータ、特に自動車の場合に必ず生じる問題は、低速においてはトルクが要求されるとともに、同時に、バッテリー電圧制限下で高速運転速度域をできるだけ広くとり、しかも高効率高出力性能を常に保持したいという背反問題である。近年、これに対しては埋込磁石構造回転子を有するリラクタンストルク併用型 PM モータが用いられ、高速運転域は弱め界磁運転によってその特性を保証している。しかし、ここでの弱め界磁制御は永久磁石に逆磁界をかけることになるので、減磁対策などに苦慮することが多い。この問題の克服とモータ自身の小型・軽量化の実現は、今後も追求される課題である。

そのひとつの実現方法として、従来のハイブリッドステッピングモータ (HBM) と類似構造の多極永久磁石機に、粉末成形磁性体 (SMC: Soft Magnetic Composites) とトロイダル界磁コイルを組み合わせた新構造永久磁石同期モータを筆者らの研究グループが提案している。このモータの特徴は、三次元磁気回路の利用により自在な弱め・強め界磁調整を実現できる点にあり、いわば、同期モータを用いて、あたかも直流分巻モータのごとき運転特性を呈示できる点にある。

Fig. 7 は提案モータの概略図であるが、このモータの特徴を列記すると

- (1) 電機子巻線とは独立に弱め界磁制御が可能。
 - (2) 永久磁石起磁力と逆方向の電機子巻線起磁力を発生させて合成起磁力を下げる従来の弱め界磁方式に対し、磁石と界磁コイルの起磁力が常に同一方向となり、永久磁石減磁の問題が不問となる。
- などの磁気回路設計上の自在性に優れている。

3. 磁石レスモータの例

3.1 真空中での動作が要求されるサーボモータ¹⁰⁾¹¹⁾

熱の放散に難を有する真空中用途で、熱減磁の心配のないモータを実現したいという基本的な要求に対して、具体的には既存の出力 400 W クラスの希土類永久磁石モータと同一体格、電源仕様で、永久磁石を用いな

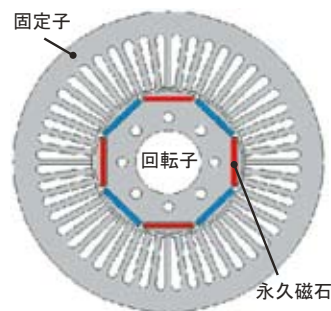


Fig. 6 埋込磁石型モータ

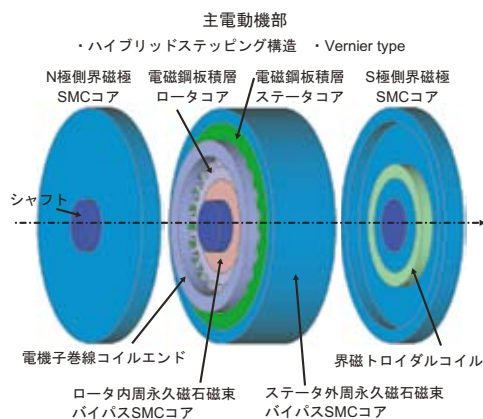


Fig. 7 三次元磁気回路を用いた新構造ハイブリッドモータの概念構造図

いタイプのモータで、同一速度-トルク特性、できるならばそれを凌駕するモータはありやなしや? という問いかけに対するソリューションである。

この問いかけに対して、まずは設計方法として、モータの磁気回路のみならず駆動回路とコントローラを包括した連携解析に、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた自律的最適解探索法を提案して、個別のケーススタディによってその有効性を確認した。さらに、スイッチトリラクタン্সモータを候補として、同一外形寸法の元で相数の制約を外し、三相から六相までのモータについて最適解の探索を行った。

結果として、Fig. 8 に示すように、四相 8/6 極スイッチトリラクタン্সモータのみが要求 N-T 特性を満足することが明らかになった。試作機による特性検証結果も Fig. 9 に示してあるが、実機による実測速度-トルク特性は設計値より全体的に低い結果となっている。この原因は電動機外枠に固定子鉄心を焼きばめ固定した際に生ずる鉄心の磁気特性劣化であることが確認されているが、この効果の設計段階での定量的な事前予測は今後の課題である。このモータの効率も、磁石レスにもかかわらず 400 W 出力での実験値で 85% 超である。

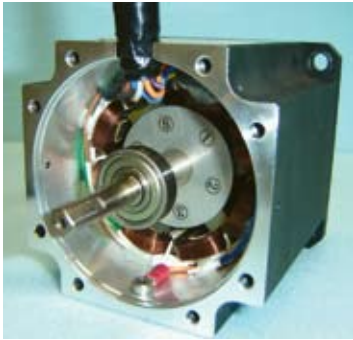


Fig. 8 400 W 試作機の概観写真

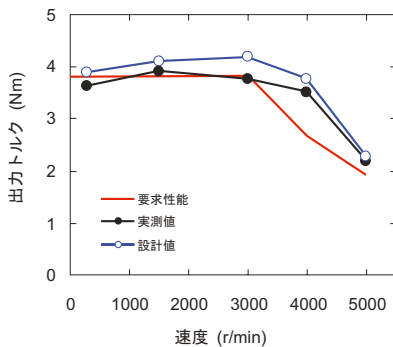


Fig. 9 最大速度 - トルク特性の実機評価結果

3.2 冷蔵庫圧縮機用モータ¹²⁾¹³⁾

この開発の狙いは、比較的容量の小さな冷蔵庫の低価格化の方策のひとつとして、現行のブラシレス DC モータに匹敵する安価な代替モータを開発することにある。より具体的には現行の永久磁石ブラシレス DC モータとの互換性の観点から、同一体格のもとで、その要求トルク性能と静音性を満たすモータの構造設計を行うことになる。

実現方法として、現行製品との互換性から制御面で汎用インバータ回路を使用することを前提として、磁石レスで比較的高効率なモータとして二相スイッチトリラクタンスモータを候補として選択し、前述の GA を用いた解の探索を行い、最大トルク、最高効率を実現するモータ形状の最適化と制御パラメータの連成問題の最適化を実現した。

Fig. 10 が最終的に設計した圧縮機用二相 8 / 6 極 SRM で、要求通りの性能を満足することを実機を用いて確認できた。現行ブラシレス DC モータに対し、モータコストで 20% の削減が可能であり、かつ、制御との組み合わせによって低トルクリプルが実現した。



Fig. 10 250 W 圧縮機用二相 SRM の概観写真

3.3 油圧ポンプ駆動用モータ¹⁴⁾

工作機械などに使われる油圧ポンプの省エネルギー化は意外に遅れていた。これを可変速モータによる能力運転によって、運転時間の大半を占める保圧時の効率改善をするためのモータ開発を目的とした。従来は IM と可変容量ピストンポンプで、保圧状態でも常に回転して多くの電力を無駄にしていた。

これに対して、SRM と定トルク特性の固定容量ギアポンプを用いた可変速駆動を提案し、製品化に至ったのであるが、従来からポンプの慣性モーメントに比してモータの慣性モーメントが大きいことが即応動作の弊害になっていた点に着目してのソリューションであった。ダンパー制御による油量調整に劣らぬ油量調整速度実現のためには、回転子慣性モーメントを小さくできる SRM の特徴を生かすことができた。これによって、保圧時の回転数を極低速まで下げることが可能で、消費電力を大幅に削減できた。

結果的にはモータの可変速化と高効率駆動により従来品との比較で 50% の省エネルギー効果を実現し、モータ体積が 50% 削減でき、保圧時の騒音を約 5 dB 低減して低騒音化が実現した。Fig. 11 はモータ概観図、Fig. 12 はこのモータを搭載した油圧ポンプユニットである。

4. 支援技術と課題

4.1 近年のモータを支える支援技術¹⁵⁾

長いモータの歴史の中で、モータ開発技術はもっぱら電機メーカーの手中にあった。それが、近年、必ずしも電機メーカーの手を借りずともモータ開発、あるいはモータ駆動系開発が行えるようになってきた背景には、次のような理由がある。

- (1) パソコンレベルで実行できる磁界解析技術の進歩により、鉄の非線形磁気特性を踏まえたモータの高精度な電磁構造設計が極めて容易になった。
- (2) スwitching動作を伴う回路現象の優れたシミュ

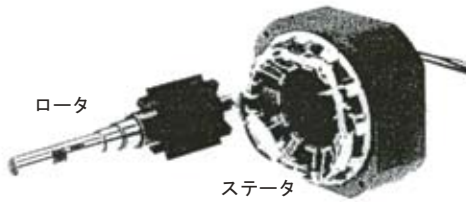


Fig. 11 油圧ポンプ駆動用 SRM の概観図

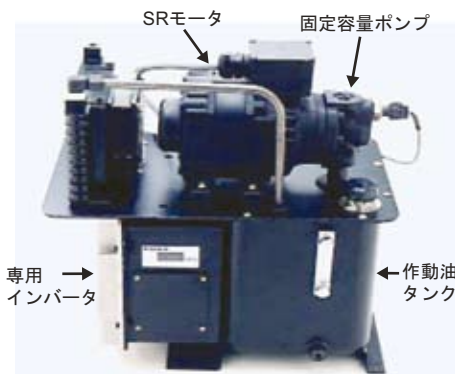


Fig. 12 SRM 搭載の油圧ポンプユニット

ロータが容易に扱える環境が整った。

- (3) パワーデバイスの技術革新やマイクロプロセッサの進歩により、非線形磁気現象を織り込んだ制御の実現が容易になった。
- (4) いろいろな制御理論が実用レベルで展開され、プロセッサの処理時間の制約の中で実行可能なプログラムとして表現できるようになった。

この結果、最近では、効率、エネルギー密度、トルク平滑性、電磁ノイズ対応策などを実現するために必要なインバータの電気回路現象とモータの電磁現象を連成した設計法が実用レベルに達しつつある。

このような支援技術環境の中で、モータの更なる性能向上を実現するためには、次の 4.2 節、4.3 節の 2 点が重要である。

4.2 材料特性の向上

希土類系磁石がモータの特性向上に果たした役割のような材料特性面での革新、例えば、既存磁石の一層の高保磁力化と高抵抗率化などに期待が寄せられる。さらに、伝統的な二次元磁気回路でモータ内部の電磁現象を考えるのではなく、三次元磁気回路の発想をするならば、例えば鉄損軽減のための積層鋼板に代わって三次元的には無方向性磁心として考えられる圧粉磁心の特性値や機械的強度、加工性の飛躍的向上に大きな期待を持ちたいものである。

4.3 評価技術

解析精度、あるいは設計精度の一層の改善を図るためには、今までの議論では必ずしも明らかになっていなかった非モデル化現象のモデル化、換言すれば可視化が求められる。具体的には、前章で述べてきた事例の中にも見られるように、実使用状態におけるモータ性能の予測評価のためのモデル化、例えば、磁石の熱減磁の主因となる磁石渦電流損の評価や、鉄心に作用する応力を含めた磁気的な特性評価を内包した磁性材料特性のモデル化技術の開発が考えられる。

4.3.1 評価技術としての磁石渦電流損評価

エンジンに隣接配置されて磁石の耐熱設計に特に厳しい要求を持つ HEV 主機用途では、磁石の熱減磁とコストに配慮した設計が必要で、それには熱減磁の主因となる磁石渦電流損の正確な把握が必要である。しかし、実際にインバータ運転している場合、磁石渦電流損を実験的に分離することは困難である。そこで、筆者らの研究室では渦電流損の発生原理を忠実に再現した Fig. 13 の評価装置を対象に、磁石渦電流損の評価とその解析モデルの開発を行っている。

この評価装置では、磁石での渦電流損と銅板での鉄損が消費電力の大半を占めるため、これらの分離が精度の点で重要である。磁石での渦電流損を正確に測定するためには、永久磁石部で各磁束密度条件を満たすときと同じ状態で銅板単体での実験を行い、そのときの消費電力とコイルでの銅損の差で得られる銅板での鉄損を測定すればよいと考えられる。

このようにして分離した鉄損の実測値と解析値を比較した結果を Fig. 14 に示す。実測値に対して、解析値は全体的に低く得られ誤差を有するが、周波数の二乗で変化する渦電流損の増加傾向をよく表している。Fig. 14 に見られる誤差は、銅板単体の試験において、

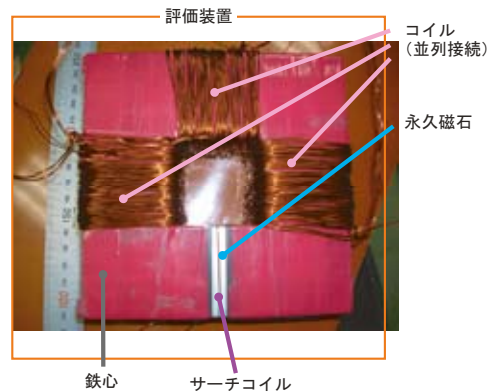


Fig. 13 鉄損評価装置

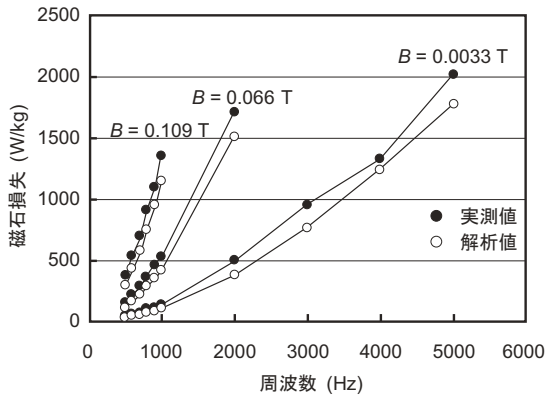


Fig. 14 周波数に対する磁石鉄損の変化の比較

永久磁石の固定界磁による鉄の動作点変化が考慮されていないことや、コイルの巻き方に起因した漏れ磁束の変化、それに伴って生じるコア内部の不均質な磁束密度分布など、非常に簡単な測定システムにおいても可視化が困難な現象が含まれることが要因と考えられ、これらの究明が今後の課題である。

4.3.2 鉄心に作用する応力を含めた特性評価

モータの固定子はフレーム内に焼嵌めなどにより固定して用いられることが多いが、焼嵌めに起因する応力によって鉄心の磁気特性が劣化し、これによる鉄損の増加が懸念される。Fig. 15 は、電磁鋼板 50A800 の圧縮応力下での磁気特性変化を示しており、応力によって比透磁率が低下すると共にヒステリシス損失も増加傾向にあることが分かる¹⁶⁾ また Fig. 16 に示すように、引張応力では磁気特性の低下が比較的緩やかであるのに対し、圧縮応力では急激に劣化する¹⁷⁾ これに対し、構造解析と磁界解析を連成することで鉄心各部の応力分布すなわち磁気特性分布を考慮したモータ特性評価を行う手法が検討されている¹⁸⁾

最近では、Fig. 16 の引張応力下での特性劣化量が圧縮応力下より緩やかであることに着目し、モータ鉄心形状の工夫により、引張状態にあるコア部分の割合を増加させ圧縮状態にあるコア部分の割合を相対的に減少させて効率を改善する事例も紹介されている¹⁸⁾

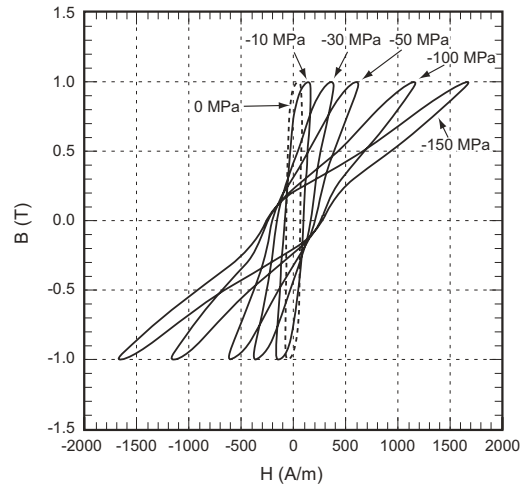


Fig. 15 圧縮応力下のBH曲線測定結果 (50A800, 50 Hz)

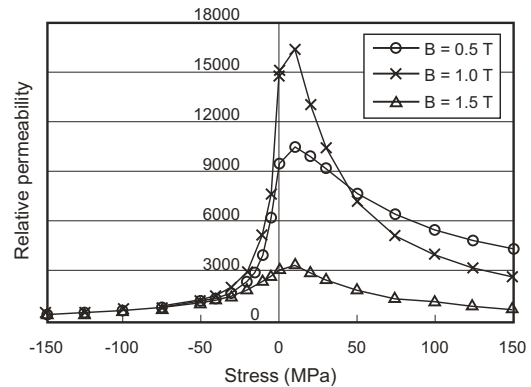


Fig. 16 応力による比透磁率の変化の測定結果 (50A800, 50 Hz)

5. あとがき

今日のモータを取り巻く状況の中で、筆者らが提唱する「用途指向形モータ」の具体的な姿を、究極の高トルク密度モータへの道としての永久磁石モータと、資源問題への選択肢としての磁石レス高トルクモータという形で示した。さらに、それらの一層の発展のためには、今は必ずしも明確にされていないままに特性計算の中にもぐってしまっている現象の「みえる化」としてのモデル化が必須で、これには独自の計測技術、評価技術が改めて必要になることを実例を挙げて示し、今後の課題とした。

<参考文献>

- 1) 松井信行：“用途志向型電動機 概論”，電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，S1-1 (1995).
- 2) Y. Kano, T. Kosaka, and N. Matsui: “Magnetization Characteristics Analysis of SRM by Simplified Non-linear Magnetic Analysis”, Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka (PCC-Osaka 2002), Vol. 2 (2002), pp. 689-694.
- 3) Y. Kano, T. Kosaka, and N. Matsui: “A Simple Non-Linear Magnetic Analysis for Interior Permanent Magnet Synchronous”, PEMD2004 IEE Conference Publication No. 498 (2004), pp. 781-786.
- 4) 水谷良治, 松井信行：“永久磁石形低速大トルクモータとそのトルク解析法の提案”，電学論 D, Vol. 119, No. 6, (1999), pp. 796-801.
- 5) 小坂卓, 鹿山透, 松井信行：“スロットレス PM モータのロータ部 PWM キャリア損評価法”，電学論 D, Vol. 125, No. 5 (2005), pp. 511-518.
- 6) T. Kosaka, N. Matsui, T. Shikayama, and R. Oguro: “Drive Characteristics of Slotless PM Motors”, Proc. of IEEE/IAS Ann. Meeting, Vol. 2 (1999), pp. 894-899.
- 7) 星野昭広, 磯辺真一, 森本雅之, 小坂卓, 松井信行：“特定用途指向型モータの一設計法”，電学論 D, Vol. 123, No. 11 (2003), pp. 1262-1268.
- 8) T. Kosaka, Y. Kano, N. Matsui, and C. Pollock: “A Novel Multi-pole Permanent Magnet Synchronous Machine with SMC Bypass Core for Magnet Flux and SMC Field-pole Core with Toroidal Coil for Independent Field Strengthening/Weakening”, Proc. of 11th European Conference on Power Electronics and Applications, No. 596 (2005).
- 9) 金哲国, 小坂卓, 松井信行：“新構造ハイブリッドモータの性能検討”，
- 10) 若山裕史, 小坂卓, 松井信行, 加納善明, 鹿山透：“鉄損を考慮した短ギャップ長高効率 SR モータの最適構造設計”，電気学会回転機研究会資料，RM-06-53 (2006), pp. 77-82.
- 11) T. Kosaka, A. Kume, H. Wakayama and N. Matsui: “Development of High Torque Density and Efficiency Switched Reluctance Motor with 0.1mm short airgap”, Proc. of 12th European Conference on Power Electronics and Applications, No.834, Sept. (2007).
- 12) 加納善明, 小坂卓, 松井信行：“GA による圧縮機用二相 SRM のコンピュータ援用最適電磁設計”，電学論 D, Vol. 127, No. 2 (2007), pp. 208-216.
- 13) Y. Kano, T. Kosaka, and N. Matsui: “GA-Based Autonomous Electromagnetic Design and Experimental Verification of Two-Phase Switched Reluctance Compressor Drive”, Proc. of 12th European Conference on Power Electronics and Applications, No.678 (2007).
- 14) 大山和伸：“実践域に入る新型モータ - 油圧ポンプ用 SRM -”，2002 モータ技術シンポジウム，日本能率協会 (2002), pp. B5-1-1-B5-1-10.
- 15) N. Matsui: “Progresses for a Last Decade and Perspectives in Applications Specific Electric Motors and Drive in Japan”, Proc. of the 4th Power Conversion Conference PCC Nagoya 2007, Keynote Lectures (2007), pp. K-17-21.
- 16) 大穀晃裕, 中野正嗣, 谷良浩, 山口信一, 都出結花利, 有田秀哲, 吉岡孝, 藤野千代：“鉄心内部の応力分布の影響を考慮した永久磁石モータのコギングトルク解析”，電学論 D, Vol. 126, No. 1 (2006), pp. 74-83.
- 17) K. Fujisaki, and S. Satoh: “Numerical Calculations of Electromagnetic Field in Silicon Steel Under Mechanical Stress”, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No. 4 (2004), pp. 1820-1825.
- 18) 佐藤光彦, 金子清一, 富田睦雄, 道木慎二, 大熊繁：“電磁鋼板の性質を利用した焼嵌めによる効率低下を改善する固定子形状の検討”，平成 17 年電気学会産業 応用部門大会，3-91, III (2005), pp. 375-378.

<著者>



松井 信行
(まつい のぶゆき)
名古屋工業大学大学 学長
工学博士

1943年5月7日生。1968年3月名古屋工業大学大学院修士課程修了。同年4月名古屋工業大学助手、講師、助教授を経て、1985年4月同電気情報工学科教授、2000年4月～10月同大学副学長、2004年1月同大学学長、現在に至る。

パワーエレクトロニクスおよびモーションコントロールの研究と教育に従事。2004年電気学会業績受賞、2005年IEEE/IAS Outstanding Achievement Award受賞。計測自動制御学会、高速信号処理応用技術学会、電気設備学会各会員。IEEE Fellow。