

モータ技術の動向と展望

大阪府立大学 大学院工学研究科

教授 森本 茂雄



1 まえがき

モータの歴史は、19世紀前半の電磁現象の発見に端を発し、現在使用されているモータの多くは100年以上前にその原形が完成しているが、その後、現在に至るまで進歩を続け、モータ性能は飛躍的に向上してきた。

その背景には、(a) 永久磁石の高性能化と低価格化、鉄心材料の進歩および加工、組立などの生産技術の進歩、(b) 静・動磁界解析、3次元磁界解析による構造設計など計算機援用設計・解析技術の進歩、(c) モータを駆動するインバータなどの駆動回路と半導体スイッチングデバイスや実装技術の進歩、(d) ベクトル制御を代表とするモータ制御理論の発達と高性能制御を実現するマイクロプロセッサの進歩や専用ICの開発、などに加えて近年の環境・エネルギー問題に対応するための高効率・省エネルギー化への強い要求がある。

本稿では、近年発展が著しい永久磁石同期モータを中心にモータ技術の動向と課題を概観し、今後の展望について述べる。

2 ブラシレス同期モータの分類と特徴

2.1 分類と代表的構造

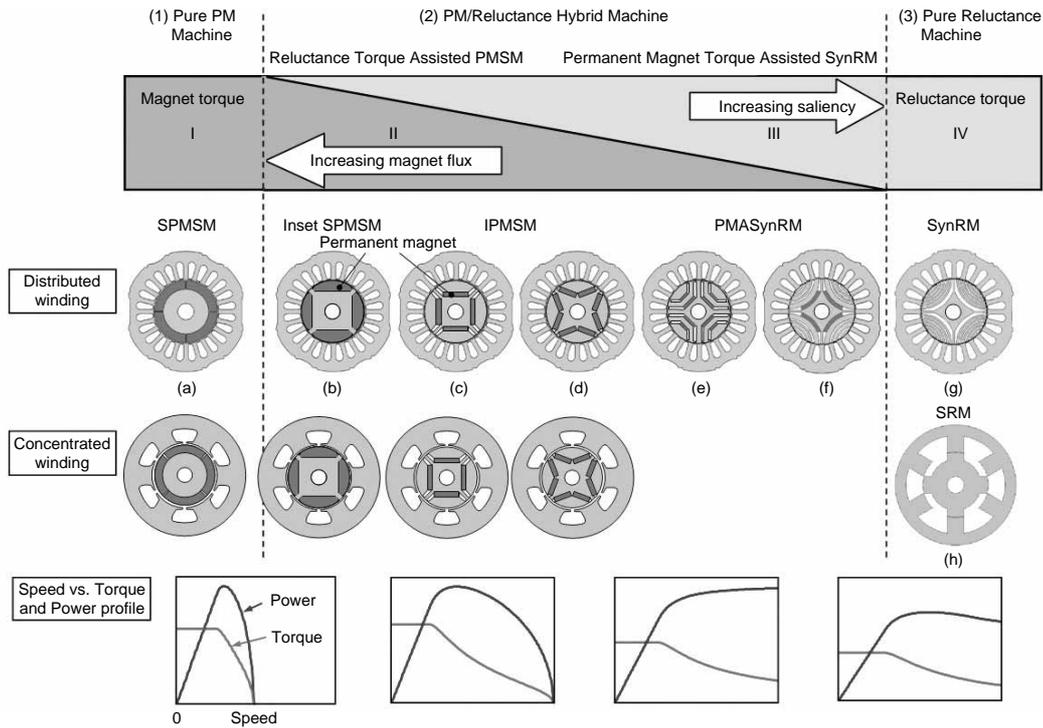
ブラシレス同期モータのトルクは、永久磁石磁束によるマグネットトルクと磁氣的突極性により生じるリラクタンストルクから成り、それらの割合はモータの電磁構造設計に依存する。第1図に、2種類のトルクの配分と代表的なモータ構造を示す¹⁾⁻³⁾。永久磁石同期モータ(PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor))は、マグネットトルクのみを利用する非突極PMSM(図中の領域)と、マグネットトルクとリラクタンストルクを併用するPM (Permanent Magnet) / リラクタンスタイブリッドモータ(領域 ,)に分かれる。磁石を使用せず、リラクタンストルクのみを利用するのがリラクタンスマータ(領域)である。

永久磁石をロータ表面に張り付けた表面磁石同期モータ(SPMSM (Surface PMSM); (a))は、一般に突極性はないが、インセット型PMSM (Inset SPMSM; (b))は突

極性を有する。永久磁石を回転子鉄心に設けた磁石挿入孔に納めるのが埋込磁石同期モータ(IPMSM (Interior PMSM); (c) ~ (f))である。IPM (Interior Permanent Magnet) 構造にすると磁氣的な突極性が生じ、リラクタンストルクも利用できる。一般に、突極性を大きくするためには多層の磁束障壁を設ける((e), (f))。リラクタンスマータには、分布巻ステータを有し正弦波駆動を行うシンクロナスリラクタンスマータ(SynRM (Synchronous Reluctance Motor); (g))と二重突極構造で集中巻ステータを有し矩形波駆動を行うスイッチトリラクタンスマータ(SRM (Switched Reluctance Motor); (h))がある。PMSMにおいても分布巻ステータに加え、集中巻ステータが採用されてきている。ただし、集中巻ステータを用いるとリラクタンストルクが低下するためリラクタンストルクを主とするPMSMやSynRMには不適である。

2.2 速度 - トルク特性

ブラシレス同期モータでは、マグネットトルクとリラクタンストルクの配分によって、おおよそ第1図に示す速度 - トルク・出力特性のように高速運転特性が異なる。モータ誘起電圧は速度上昇に伴い増加するため電圧飽和後は負の d 軸電流を流す弱め磁束制御を用いて等価的な弱め界磁制御を行う。このときの速度 - トルク・出力特性の概形は、磁石磁束と d 軸電機子反作用磁束の関係で決まる⁴⁾。SPMSMのようにマグネットトルクを主とするモータは、弱め磁束効果が小さく、高速定出力運転には不適である。リラクタンストルクも利用するIPMSMでは、定出力運転範囲が広くなり、適切な設計をすれば非常に広い速度範囲の定出力運転も可能となる。ある程度広い定出力運転が要求される電動車両(HEV (Hybrid Electric Vehicle), EV (Electric Vehicle)など)の用途では、マグネットトルクよりもリラクタンストルクが大きいIPMSMが使用されている³⁾。磁石を使用しないSynRMでは高速運転は可能であるが、力率が悪いので、出力は低い。SynRMのスリット部に永久磁石を補助的に挿入した永久磁石補助形SynRM (PMASynRM (Permanent Magnet Assisted SynRM); (e), (f))では、力率、効率を大幅に改善できる⁵⁾。



第1図 ブラシレス同期モータのトルク配分と代表的構造および速度 - トルク・出力特性

3 高性能化技術

モータドライブシステムは、第2図に示すようにモータ本体とそれを駆動する電力変換器および制御から構成され、高効率化、小形軽量化、高トルク化、低振動・低騒音化など多くの要求に対応するため、図中に示すようなさまざまな技術を駆使している。以下に、その主な取り組みを示す。

3.1 高効率化

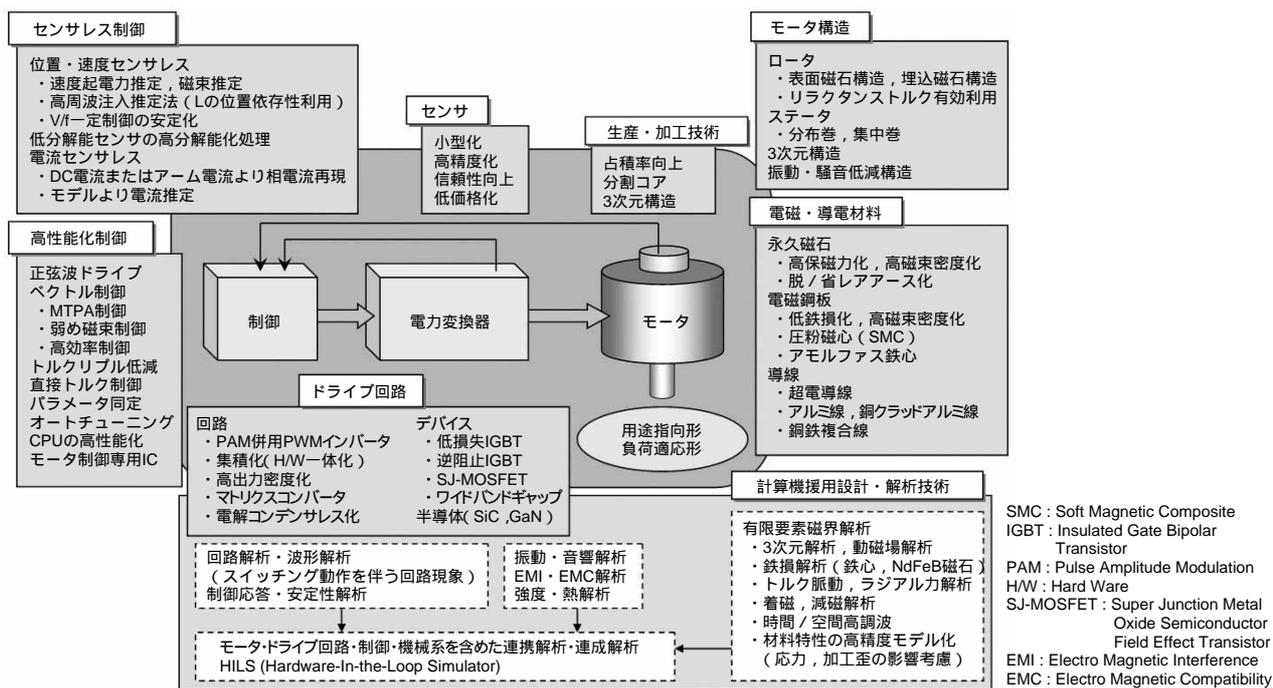
モータは電気・機械エネルギー変換機として数多く使用され、その電力使用量は国内電力使用量の50%以上を占めるため、省エネルギーの観点からモータの高効率化は最重要課題の一つである。第1表に、高効率化（損失低減）手法をまとめて示す^{2),3)}。

モータの主な損失として、銅損と鉄損がある。銅損の低減には、電流あたりの発生トルクの増加や巻線抵抗の低減が必要である。発生トルク/電流比を増加するには、電流あたりのマグネットトルクとリラクタンストルクを増加すればよい。リラクタンストルクの増加は、埋込磁石構造を採用し、ロータ構造を工夫することで実現できる。一方、マグネットトルクの増加は、使用磁石量の増加や磁石材料のハイグレード化で実現できる。希土類磁石、特にNdFeB（ネオジウム・鉄・ボロン）系焼結磁石の高性能化（残留磁束密度と保磁力の増加）は、高効率化

に加えて小形化、高トルク密度化に大きく貢献し、PMSMの適用分野の拡大に寄与している。

ステータ巻線についても銅損低減の取り組みがなされている。交流モータ（PMSMやIM（Induction Motor））は、一般に分布巻ステータが用いられてきた。これを集中巻にするとコイルエンドが大幅に低減でき、コイル抵抗の減少による銅損の低減が可能となる。さらに、軸方向寸法を短縮でき、小形化も実現できる。しかし、集中巻ステータは、磁石磁束の有効利用率の低下、リラクタンストルクの減少、高調波磁束成分の増加に伴う鉄損の増加や振動・騒音の増加といった問題点もある。また、分割コアの採用など占積率の向上に向けてのステータ巻線工法の進展も、銅損低減、小形・高出力化に大きく貢献している。

希土類磁石を使用したIPMSMや集中巻ステータの採用により、銅損が低減されるとともに鉄心の磁束密度は高くなり、損失として鉄損が支配的となる傾向があるため、さらなる高効率化には鉄損低減が重要である。鉄損低減には、低鉄損電磁鋼板（鋼板の薄板化、高Si化）の使用が効果的である。電磁鋼板における低鉄損化と高磁束密度化は一般にトレードオフの関係にあるが、IPMSMや集中巻ステータの採用によるモータの高磁束密度化と鉄損低減の要求から、それらを両立する電磁鋼板の開発とモータへの適用が進んでいる。また、空間高調波磁束の低減や磁束集中を緩和する電磁構造設計に加え、駆動電圧、電



第2図 モータドライブシステムの基本構成と関連技術

第1表 高効率化（損失低減）に向けた取り組み

損失低減法	具体的方法	技術・課題
トルク / 電流比の増加	マグネットトルクの増加 （磁石量増加・高性能磁石使用） リラクタンストルクの増加 高磁束密度電磁鋼板の使用 電流波形の最適化 最適電流位相制御	高残留磁束密度，高保磁力，低コスト化， レアアース問題 IPMロータ，最適電磁設計 低鉄損化との両立 正弦波駆動 最大トルク / 電流制御
巻線抵抗の低減	ステータ巻線構造 ステータ巻線工法	集中巻ステータ，振動・騒音対策 占積率の向上，分割コア
鉄損の低減	低鉄損材料の使用 高調波磁束の低減 磁束集中の緩和 高調波電流の低減 最適電流位相	低鉄損電磁鋼板（薄板化，高Si化）， 高磁束密度化との両立 細部の最適電磁構造設計 ロータへのスリット挿入など電磁構造設計の工夫 正弦波駆動，駆動電圧，電流波形の最適化 ベクトル制御，弱め磁束制御
うず電流損の低減 （鉄心以外）	SUS管除去 磁石の分割	インセットSPMSMの磁石保持，IPM構造 最適分割数の選定

流波形の最適化など駆動・制御面からの取り組みも重要である。

鉄心以外にも、希土類磁石の表面やSUS管（磁石飛散防止管）では、スロットリプルなどによる高調波磁束やPWM（Pulse Width Modulation）インバータによる高周波電流によりうず電流損が発生し、効率低下を招く。IPM構造では、SUS管が不要となるため、SUS管でのうず電流損は無くなる。希土類磁石のうず電流もIPM構造にすることで低減でき、さらに適切に分割することで損失低減が可能となる。

上記のように、NdFeB系焼結磁石を使用したIPMSMが高性能モータの方向である^{2),3)}。また、集中巻ステータは、小容量用途や小形化が要求される用途への適用が拡大している。さらに、IPMSMは、磁石配置、マグネットトルクとリラクタンストルクの配分や速度 - トルク特性などの設計自由度が高く、特定用途に特化して最適設計する用途指向形モータ⁶⁾に適しており、今後とも発展していくものと考えられる。ただし、希土類磁石には、レアアース材料を使用しているという課題がある。

3.2 振動・騒音の低減

高効率化に加えて、重要な課題が振動と騒音の低減である。IPMSMは、ロータ外周部が透磁率の高い鉄でできているためステータとロータ間の磁気抵抗が小さくなる傾向がある。その結果、磁気吸引力が大きくなり、エアギャップのアンバランスに対して敏感となり、より振動・騒音が発生しやすい。また、エアギャップの磁束密度分布が正弦波状であるSPMSMと比べ、IPMSMはエアギャップ磁束密度に高調波を多く含むため、コギングトルクやトルクリブルが大きくなる傾向にある。低振動・低騒音化手法として、モータ構造設計と駆動・制御からの取り組みがある。電磁構造設計では、非対称構造の採用、ステータコア外周形状の工夫、ロータ内への空隙・スリットの配置などの方法³⁾があり、局所的な磁束密度の分布や変化を十分考慮した最適設計が必要である。高トルク密度化に伴い磁束密度分布の歪（ひずみ）、磁気飽和による非線形性も増すため、今後も低振動・低騒音は大きな課題である。

3.3 制御技術

モータドライブシステムの高性能化には、モータ本体の最適設計に加えて、モータ制御技術が非常に重要である。特に、IPMSMの運転特性はその制御法に大きく依存し、運転状態に応じた適切な制御が不可欠である。

PMSMの高性能制御は正弦波駆動のベクトル制御が基本であり、リラクタンストルクを最大限有効利用し高トルク化を図る最大トルク/電流（MTPA：Maximum Torque Per Ampere）制御、高速運転を可能とする弱め磁束制御、損失を最小にする最大効率制御、などを運転状態に応じて切り替えながら制御する⁴⁾。

同期モータの制御には、位置情報が必要であり、ロータリエンコーダやレゾルバなどの位置センサが用いられる。しかし、モータの小形化、低価格化、信頼性向上、耐環境性などの観点から、位置センサレス制御が望まれる。中高速度のセンサレス制御は、永久磁石による速度起電力（または拡張誘起電圧）や鎖交磁束を利用する方式が一般的であり、静止座標（座標）あるいは回転座標（dq座標）上のモータモデルを用いて、電圧・電流情報より位置・速度を推定する。この手法はモータモデルに基づくためパラメータ誤差の影響を受ける。インバータも含めたモータドライブシステムの詳細なモデリングやパラメータ同定機能の追加など、位置・速度推定性能を向上する方法が検討されている。

速度起電力は速度に比例するため、低速および停止時に上記推定法は適用できない。IPMSMではインダクタンスに位置依存性があるため、これを利用して位置推定を行う。インダクタンスの変化を測定するため、高周波の

測定用電圧または電流を重畳する必要があり、測定用信号としては、正弦波、パルス信号、PWM高調波などがある。この方式によれば、停止・低速時での位置推定が可能となるが、位置推定用の電流を流す必要があり、騒音が問題となる。また、磁気飽和によりインダクタンスが変化することを利用して、極性判別や位置推定を行う方法もある。一方、モータの位置・速度を直接推定せず、 V/f 一定制御をベースにして電流や力率をもとに安定化を図るような比較的簡単なセンサレス手法も検討され、急激な可変速制御が不要な用途には有用である。

近年、モータの高トルク密度化が進み、高調波の増加や磁気飽和の影響が顕著になってきている。モータ制御では、基本的にモータモデルを直接的あるいは間接的に利用しているため、モデルパラメータの非線形的な変動の扱いや、基本波ベースのモータモデルの見直しが必要になると思われる。

4 モータ技術の展望

4.1 新しい材料の利用

モータの革新的な進歩には、材料の発展が大きく寄与する。その代表がNdFeB系磁石や電磁鋼板の進歩である。これらのさらなる高性能化に加え、その他の材料の進展や活用も期待される。このとき、材料特性を生かした電磁構造設計およびモータ使用法が重要である。

〔1〕圧粉磁心（SMC）

圧粉磁心は純鉄系鉄粉の表面を樹脂で絶縁し、圧縮成形したもので、成形体内の鉄粒子が互いに絶縁されているため電磁鋼板に比べて渦電流損が小さいという特徴をもつ。しかし、電磁鋼板に比べてヒステリシス損が大きい、透磁率が低い、飽和磁束密度が低いといった欠点もあり、単に圧粉磁心への置き換えだけではモータの高性能化は難しい。そこで、プレスで成形するため形状の自由度が大きく3次元立体構造も製作可能、3次元的な磁束通路が可能、リサイクルが容易、といった特長を生かしたモータ構造設計や用途開発が重要となる。

アキシヤルギャップモータでは、磁路が3次元的になるためSMCの適用が考えられる。また、SMCとトロイダル界磁コイルを組み合わせ、3次元磁気回路の利用による弱め・強め界磁制御を可能とする新構造永久磁石同期モータ（SMCコア利用ハイブリッド界磁モータ）が検討されている⁷⁾。SMCのモータコアへの適用には、高強度化、加工性の向上、高磁束密度化が課題であるが、特殊熱処理の追加による高強度化手法を開発し、圧粉磁心の形状自由度を生かした3次元鉄心と高密度コイルの採用で、軸長の短縮（小型化）と効率向上を達成した実用化例がある⁸⁾。

〔2〕アモルファス鉄心

アモルファス金属は、電磁鋼板に比べて、飽和磁束密度は低い、透磁率が高く、鉄損が極めて小さいという特徴があり、電力用高効率変圧器に採用されているが、高硬度で加工性があまり良くないため、モータへの適用は進んでいない。

矩形波駆動され鉄損の割合が大きいSRMに熱処理したアモルファス合金積層体を使用し、PMSMと同等の高効率化を達成した報告⁹⁾や、アモルファス金属を巻いて鉄心を構成することでアキシシャルギャップモータの高効率化を実現した事例¹⁰⁾もある。

〔3〕ワイドバンドギャップ半導体

モータドライブシステムの高効率・高性能化に半導体デバイスが果たした役割は大きい。MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)、IGBT、GTO (Gate Turn Off Thyristor)などの既存の主流デバイスは、先端Siプロセス技術の進歩に伴い、理論的性能限界に近づきつつあり、電力変換器のさらなる高効率化、高出力密度化を目指すには、新しいデバイスの登場が待たれる。SiCに代表されるワイドバンドギャップ半導体は、損失が極めて小さく、高温動作が可能なパワーデバイスであり、モータ駆動用インバータに使用すれば、高効率化や高出力密度化が大いに期待される。

4.2 脱・省レアアースモータ

PMSMの高性能化には、NdFeB系焼結磁石が大きな役割を果たした。NdFeB磁石には、Ndに加え、保磁力を高めて減磁耐力を増すためDy (ジスプロシウム)などの希土類元素 (レアアース)が必要である。これら希土類材料の供給は特定の国に依存しており、価格の高騰や安定供給の面で懸念があり、今後、HEV、EV用をはじめ希土類磁石が大量に使用されることを考えると大きな問題である。このような背景から、性能を維持したまま、希土類磁石を使用しない (脱レアアース)、または使用量を大幅に削減する (省レアアース)モータの開発が求められる。NEDO (独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)の「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」プロジェクトの一環として、脱・省レアアースモータの研究開発が取り組まれている¹¹⁾。

脱レアアースモータの候補としては、誘導モータ、リラクタンスモータ (SRMやSynRM)、コイル界磁式同期モータ、フェライト磁石同期モータなどが挙げられるが、希土類磁石を使用せずに希土類PMSMと同等の性能を得るには革新的な工夫が必要である。最新の磁性材料の活用、3次元磁気回路設計など、新しい発想のモータ開発が求められる。

4.3 計算機援用設計・解析技術

モータの高性能化に有限要素磁界解析をはじめ計算機援用設計・解析技術が果たした役割は非常に大きい。今後も、磁界解析技術がモータ設計における最強の支援ツールであることに疑いの余地はない。このとき、材料特性のより高精度なモデル化が重要となる。焼嵌 (ば)めに起因する応力による透磁率の低下、ヒステリシス損の増加などの磁気特性の劣化や鋼板の打ち抜きによる加工歪の影響など、実使用状態における材料特性をモデル化し、解析を行うことでより正確な鉄損計算を含む高精度なモータ性能評価が期待される。また、各種制約条件の下で要求仕様を満たす最適設計には、磁界解析と最適化エンジンの組み合わせが有効である。ただし、モータ設計においては、ブラックボックス的に磁界解析にのみ頼るのではなく、古典的な設計法との融合やモータ理論・制御法の理解も重要である。さらに、モータシステム全体としての高性能化には振動・音響解析、回路解析、制御系解析などモータ・ドライブ回路・制御・機械系を含めた連携解析・連成解析が有効である。計算機援用設計・解析技術の進歩に伴い、モータ設計者自身のアイデア・センスが問われることになる。

5 まとめ

モータドライブシステムは、モータ本体・駆動回路・制御が有機的に結びつき、材料や生産加工技術など周辺技術の進歩にも支えられて、さらなる小形軽量化、高トルク化、高効率化、低振動・低騒音化、低価格化に向けて発展すると期待される。そこでは、汎用性よりも特定の用途に特化し、システムとして最高の性能を発揮する用途指向形モータとしての開発が進むと思われる。今後は、モータの製造エネルギーやリサイクルも考慮した、モータライフサイクル全体の高効率・省エネルギー化に向けた開発も重要となる。環境とエネルギー問題が最重要課題となっている現在、モータ技術は環境対応型社会を支える基盤技術であり、今後のさらなる進化に期待したい。

参考文献

- 1) 森本茂雄 他：永久磁石同期機の技術動向 電気学会誌 122, No.11, pp.761-764 (2002).
- 2) S. Morimoto, et. al. : Electric motors for home applications -Development of environment-friendly electric motors-. EPE Journal 14, No.1, pp.24-30 (2004).
- 3) S. Morimoto : Trend of permanent magnet synchronous machines. IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering 2, No.2, pp.38-39 (2007).
- 4) 武田洋次 他：埋込磁石同期モータの設計と制御 (オーム社) (2001).
- 5) 村上浩 他：永久磁石補助形シンクロナスリラクタンスモータ 電気学会論文誌D 122, No.3, pp.266-272 (2002).
- 6) 松井信行：用途指向型電動機 概論 電気学会東海支部連合体会講演論文集 S1-1 (1995).
- 7) 小澤泉 他：省希土類磁石高密度HEMの基礎設計検討 平成21年電気学会全国大会 No.5-012 (2009).
- 8) 榎本裕治 他：高密度圧粉磁心を適用したクローティースモータの開発 電気学会研究会資料 RM-08-120 (2008).
- 9) 鈴木貴紀 他：熱処理したアモルファス合金積層体を用いたSRMの電動機特性 電気学会研究会資料 RM-03-142 (2003).
- 10) 天野寿人 他：アモルファス巻き鉄心の永久磁石モータへの適用検討 電気学会研究会資料 RM-08-122 (2008).
- 11) 高性能モータ 課題は脱/省レアアース 日経ものづくり2008年12月号 pp.98-102 (2008).

《プロフィール》

森本茂雄 (もりもと しげお)

1982	大阪府立大学 工学部卒業
1984	大阪府立大学 大学院工学研究科 博士前期課程修了
1984-1988	三菱電機 (株)
1990	大阪府立大学 工学博士
1988-1993	大阪府立大学 工学部 助手
1993-1994	大阪府立大学 工学部 講師
1994-2000	大阪府立大学 工学部 助教授
2000-2006	大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻 助教授
2006-現在	大阪府立大学 大学院工学研究科 電気・情報系専攻 教授

専門技術分野：電気機器工学，パワーエレクトロニクス

主な著書：

- 埋込磁石同期モータの設計と制御 (オーム社，2001)
- パワーエレクトロニクス (共立出版 (株)，1992)