

# ハイブリッド自動車用 高出力・高効率の永久磁石リラクタン্সモータ

High-Power and High-Efficiency Permanent-Magnet Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles

堺 和人 萩原 敬三 平野 恭男

■ SAKAI Kazuto

■ HAGIWARA Keizo

■ HIRANO Yasuo

省エネルギーと環境問題に対応してハイブリッド自動車(HEV)が実用化されてきている。次世代自動車では燃費と走行性能を両立するため、高効率で広い範囲の可変速運転を可能とする駆動システムが必要である。

東芝は自動車駆動に最適な新規の永久磁石リラクタン্সモータ(PRM)を開発し、95～97%の高効率と1:5の広い可変速比を実現した。PRMは多目的スポーツ車(SUV)及びトラックのHEVに適用されており、世界初のSUVのHEVに搭載したPRMでは、出力は65 kW、最高回転数は13,500 rpmを達成している。

The recent progress of new technologies will eventually lead to the realization of new-generation vehicles with high efficiency and high performance. One new technology is the variable-speed drive that operates over a wide range of speeds.

Toshiba has developed a novel permanent-magnet reluctance motor (PRM) that operates over a wide variable-speed range (1:5) with high efficiency (95-97%). The PRM has been applied to two hybrid electric vehicles (HEVs): a sports utility vehicle (SUV) and a truck. The PRM for the world's first hybrid SUV features an output power of 65 kW and a high rotational speed of 13,500 rpm.

## 1 まえがき

省エネルギーと二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などの排ガスの環境問題を改善するため、電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HEV)が開発されてきた。HEVとEVでは、モータがエンジンの代替となり、モータの性能は車の走行性能及び燃費に大きく影響する。したがって、モータの性能がHEVの実用化の重要なカギとなる。

そこで東芝は、小型・高出力、広い可変速運転範囲、及び高効率の永久磁石リラクタン্সモータ(PRM)を開発し製品化した。

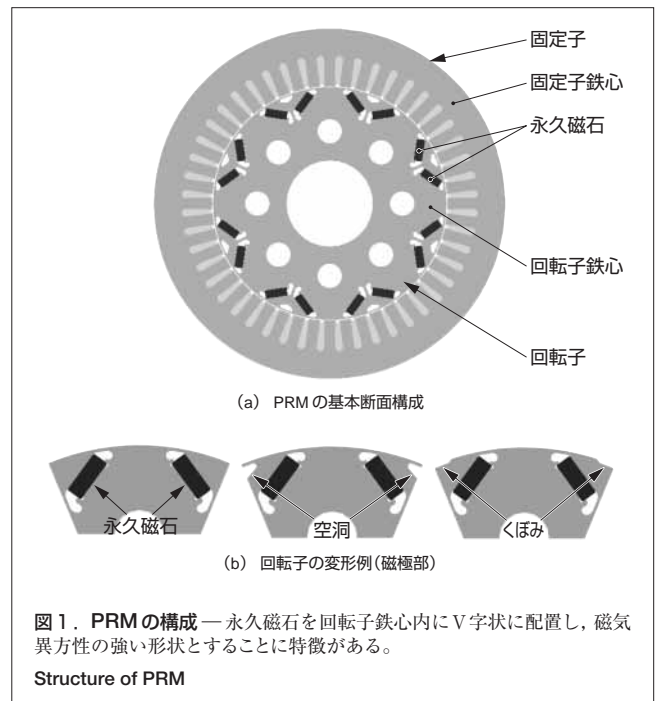
ここでは、PRMの構成及び特性と、HEV用PRMについて述べる。

## 2 PRMの概要

### 2.1 自動車駆動用モータ

一般的な家電や産業用モータでは定格点の特性を満たす設計が行われる。一方、HEVやEV用モータでは、自動車の運転状況に応じてトルクと回転速度が変化する。そのため定格出力は点ではなく、トルクと回転速度の面的な特性で表される。したがってモータは、トルクと回転速度における面的な運転範囲内で最適な特性が要求される。この点を踏まえて、自動車用モータに要求される特性及び重要事項は以下のとおりである。

- (1) 小型で高出力



- (2) 低速域では短時間で最大トルクを発生
- (3) 中速・高速域では最大出力で広範囲の可変速運転
- (4) 無負荷・軽負荷時においても低損失
- (5) 出力当たりのモータコストは安価

### 2.2 PRMの基本構成と特性

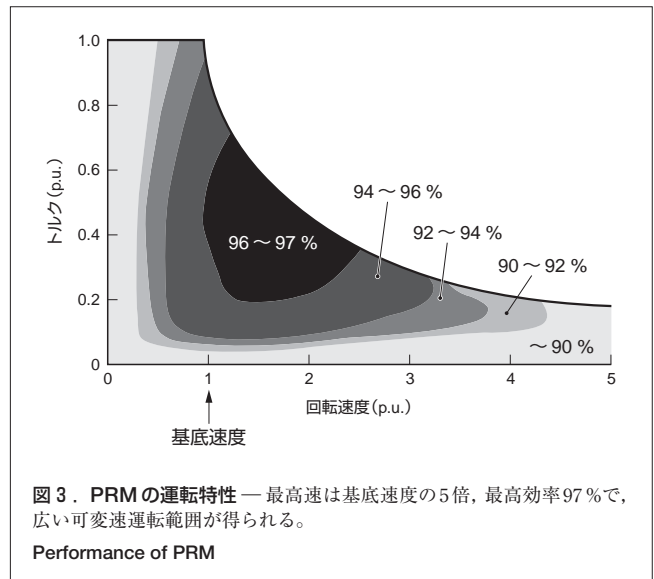
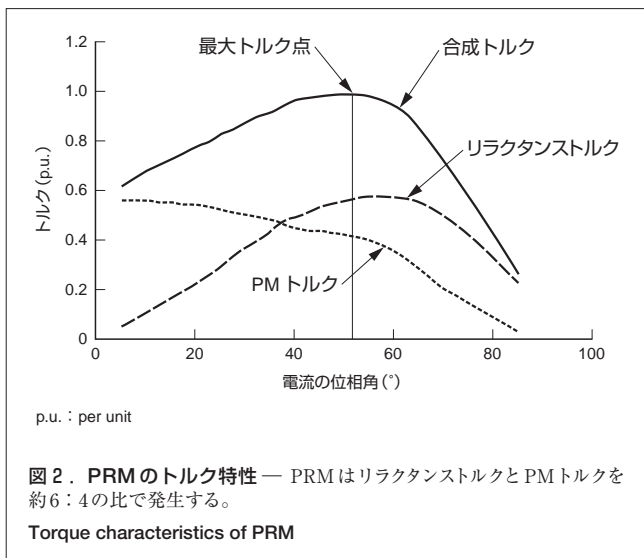
PRMは自動車の燃費と走行性能の改善に大きく寄与することを目的に開発されたモータで、小型、高出力、高効率で

あり、広い範囲の可変速運転が可能である<sup>(1),(2),(3)</sup>。

PRMの基本構成を図1に示す。PRMは、リラクタンスマータと永久磁石(PM)モータを同一断面上に複合した新規のモータであり、リラクタンストルクを主導とし、永久磁石と電流によるトルク(PMトルク)の両方を発生する。大きなリラクタンストルクを発生させるため、永久磁石を回転子鉄心内にV字状に配置し、磁気異方性の強い形状とする。また、要求される特性に応じて、図1(b)に示すように回転子は数種の形態がある。

代表的なPRMのトルクをリラクタンストルクとPMトルクに分離すると、図2に示すように最大トルク時に約6:4の比になる。PRMは電流位相を進めた状態(PMモータでは弱め磁束制御時)でもPMトルクを有効に利用している。このようにPRMは、リラクタンストルク及びPMトルクとも最大に利用して高トルク化を達成している。また、回転時に永久磁石及び鉄心の遠心力が回転子鉄心に作用するが、PRMは遠心力による応力を分散して応力集中を緩和する鉄心形状としている。これにより、高速化及び回転子外径の拡大も可能である。

車の最大駆動性能としては、低速域では定トルク、中・高速域では定出力が要求される。このため電気入力として、電流上限は低速域で要求される最大トルク時の電流になり、電圧上限は中・高速域の最大出力時の電圧で決まる。電流と電圧の上限値を小さくできれば、必要なバッテリー容量とインバータ容量を最小限にできる。すなわち、最小の電圧と電流で、最大トルク特性と最大出力特性を両立できることが重要である。PRMは励磁電流成分により電圧を広範囲に調整できるので、任意の運転ポイントで要求されるトルクと出力に応じて電圧と電流を最適値にできる<sup>(1)</sup>。これにより、図3に示すように、基底速度の5倍(可変速比5)までの広い可変速域で大きなトルクが得られ、モータで97%の最高効率



と広い運転範囲で高効率が得られている。

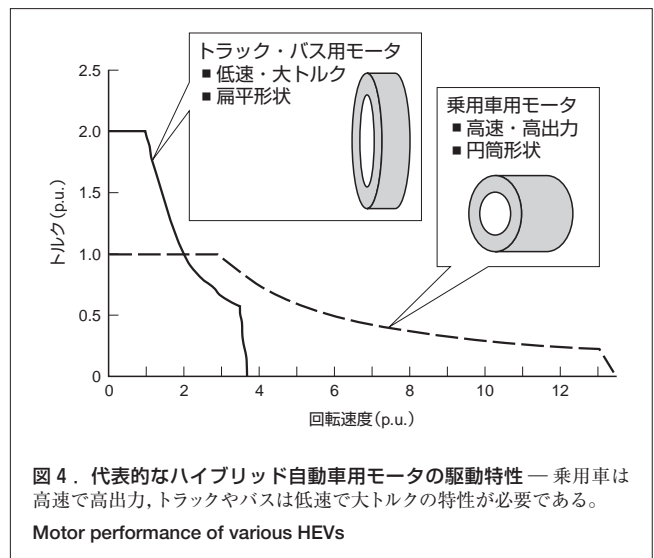
モータ駆動システムの性能は、前述の小型・高出力、バッテリーとインバータの電気容量(kVA)、及び走行性能を示す可変速比で評価され、簡易的には性能指標 $\sigma_{ev}$ として次式で表すことができる。

$$\sigma_{ev} = \frac{\text{出力}}{\text{モータ体積}} \times \frac{1}{kVA} \times \text{可変速比}$$

PRMは、この性能指標で高い評価が得られる。PRMは電源電圧と電流を最適に利用することができ、これにより広い可変速運転と高効率を得られる新しいモータと言える。

### 3 開発モータ

HEV用駆動モータは、車種によって図4に示すような特性

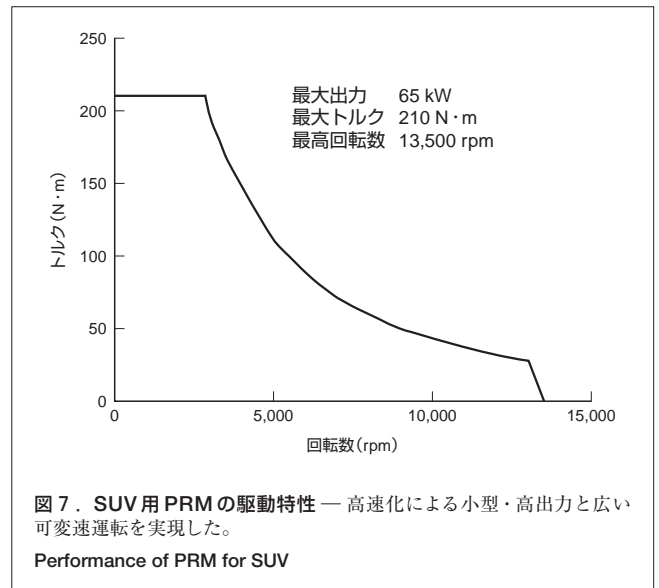
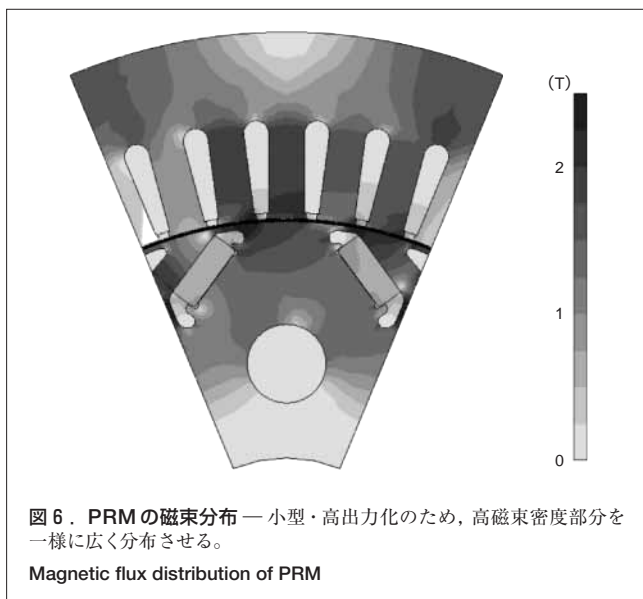
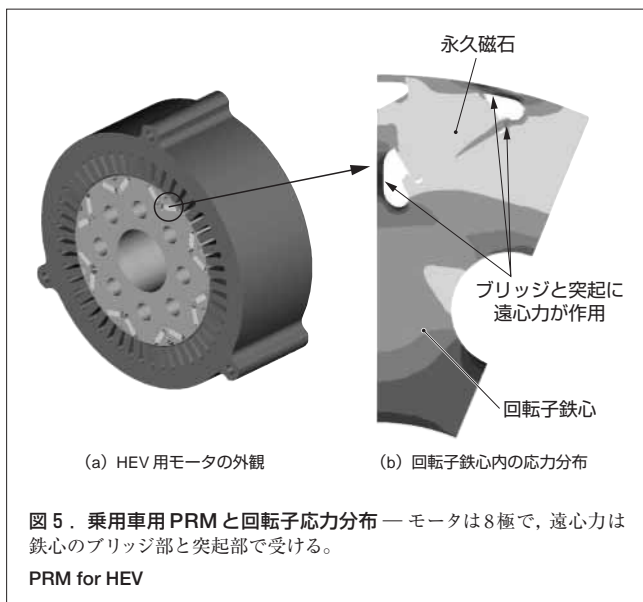


を持つ二つのタイプが主流である。乗用車用モータは高出力が重要となり、高速回転の円筒形状になる。一方、トラックやバスなどは高トルクが重要となり、低速回転で扁平(へんぺい)形状の設計となる。

### 3.1 乗用車用モータ

乗用車タイプのHEV用駆動モータは出力と可変速範囲が重要となる。小型・高出力化するため高速化し、最大回転数は10,000～15,000 rpmにも達する。乗用車タイプのHEVに搭載したPRMと最高速回転時の回転子鉄心の応力分布を図5に示す。PRMは、永久磁石と鉄心による過大な遠心力をブリッジ部と突起部に分散して鉄心で受ける形状になっているため、強度的に優れ、高速化に十分に対応できる。

モータ内の磁束密度分布を図6に示す。小型・高出力化



するため、局所的な磁気飽和を緩和して高磁束密度部分を比較的一様に分布させ、更に、永久磁石の特性を最大限に生かすように最適磁気設計を行っている。このように、磁気と構造の最適化を図ることで高出力を実現している。量産化した世界初の多目的スポーツ車(SUV)のHEVに適用したモータ<sup>(4)</sup>の駆動特性を図7に示す。

### 3.2 トラック・バス用モータ

#### 3.2.1 HEVトラック・バス

トラックやバスのHEVは、大気汚染の原因の一つとされたディーゼルエンジンからの黒煙や粒子状物質の低減を目的とし、乗用車よりも早く実用化された。当社は、1991年に世界初の量産HEVの開発に参画し、モータとインバータを製品化している。HEVは欧州を含めて都市内の路線バスに適用されたが、近年、急速に宅配便などの集配用途の小型トラックに普及してきている。

#### 3.2.2 トラック・バス用モータの特徴

トラックやバスではエンジン車と共通の車体を使用することが多く、モータには既存の機構に組み込める構造が要求される。また、商用車は荷物スペースを広く確保するため、駆動機器の搭載スペースが少なく、一方、モータは車両の重量に見合った大トルクが要求される。これらの使用条件からモータは扁平形状が主流である。主な特徴を以下に示す。

- (1) 大トルク 車両やエンジンが大きいため、特にエンジンの始動や車両の発進時に大トルクが必要である。
- (2) 扁平形状 駆動系と一体化するため、扁平形状(外径/長さ=約10)とし、十分なトルクを得るために多極(10～16極)化する。
- (3) 低・中回転速度 搭載スペースとシステム構成上、ギヤによる高速化が難しいため、エンジン速度や車輪速度並みの回転数(0～400 rpm)になる。
- (4) 空気冷却 整備性が重視されるため、水冷や油冷

方式は少なく、空冷方式が採用されている。

- (5) 高メンテナンス性 使用年数及び走行距離が長く、使用環境も厳しいため、分解整備が可能な構造とする。
- (6) 回転センサレス制御 機構上で取付けが困難な場合が多く、制御には回転センサレス方式が適用され始めている。十分なロバスト性も要求される。

**3.2.3 トラック用大トルクモータの開発** トラックの走行性能と燃費を大幅に向上させるため、扁平形状で大トルクのPRMを開発し、試作した。開発の主な技術的施策を以下に示す。

- (1) 扁平形状(外径/長さ=9)として省スペースで駆動機構に組み込みを可能とし、回転強度を確保したうえで高トルクを得るため極数は12とした。
- (2) ギャップ内の磁束分布の不均衡を抑えて、電磁騒音の低減と制御性の向上を図った。更に、回転子を分割してずらす段スキュー構造を採用した。また、誘起電圧を周辺機器の耐電圧範囲内に抑えた。
- (3) 磁気飽和特性を考慮することにより、大トルク状態でもセンサレス制御を容易にした。
- (4) 少ない永久磁石量で大トルクを達成し、低コスト化した。

試作したPRMのモータ効率を図8に示す。試作機は、運転領域の全域で良好な効率を得られ、騒音も許容値以内であった。また、PRM固有の高い磁氣的突極性を利用したセンサレス制御は良好であり、最大トルクでも高速応答で安定した駆動が得られている。限られた車上電源で大出力、高効率化を目指すことは乗用車と同じであり、PRMがトラックやバスでも今後の主流になると考えている。

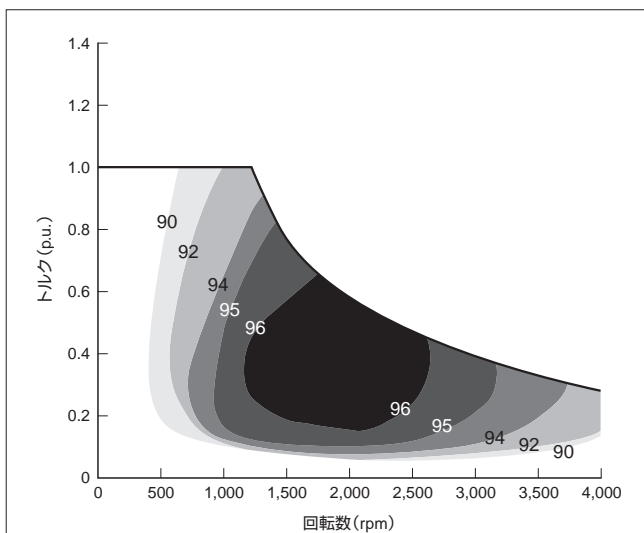


図8. トラック用PRMの運転特性—低速時に大トルクを発生し、広い可変速域で高効率を得られる。

Performance of PRM for truck

## 4 次世代HEVモータ

HEVは全車種に展開され始めており、中・大型車では100 kW級、燃料電池車では100~200 kW出力のモータが予想され、大容量化が進められている。同時に小型・高出力化も図られる。また、車の空間利用や運転性に関する制限を排除するため、ホイールインなどの車の機構部と一体化したモータも考えられる。PRMは新方式のモータであり、いっそうの特性向上が期待できる。

## 5 あとがき

PRMは従来困難とされていた小型・高出力化と広範囲の可変速運転を両立し、更に、広い運転範囲で高効率を得られた。PRMは自動車の運転特性に最適なモータであり、PRMモータの搭載により、燃費と環境に優れているだけでなく、エンジン車よりも走行性能の良いHEVが期待される。

今後は更に、小型・高出力化や、中・大型HEVと燃料電池車に対応するための大容量化を図り、次世代自動車の普及に貢献したい。

## 文献

- (1) 堺 和人, ほか. 可変速特性に優れた電気自動車用永久磁石式リラクタンスモータの開発. 電気学会論文誌D. **123**, 6, 2003, p.681-688.
- (2) Sakai, K., et al. "High efficiency and high performance motor for energy saving systems". Proc. IEEE PES Winter Meeting, Ohio, USA, 2001-01. (CD-ROM).
- (3) 堺 和人, ほか. 省エネルギーシステムを生かす可変速・高効率モータ. 東芝レビュー. **55**, 9, 2000, p.58-61.
- (4) Hisada, H., et al. "AISIN AW new full hybrid transmission for FWD vehicles". Proc. SAE, Detroit, USA, 2005-04. SAE International. p.55-60.



堺 和人 SAKAI Kazuto, D.Eng.

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主査, 工博。永久磁石モータ, ハイブリッド/電気自動車用モータの研究・開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



萩原 敬三 HAGIWARA Keizo

自動車システム事業統括部 自動車システム技術開発センター 参事。車載用モータドライブの開発業務に従事。日本機械学会会員。Automotive Systems Development Center



平野 恭男 HIRANO Yasuo

東芝産業機器製造(株) 新規事業推進部主幹。産業用PMモータ, ハイブリッド/電気自動車用モータの開発・設計及び製造技術開発に従事。Toshiba Industrial Products Manufacturing Corp.

Toshiba Industrial Products Manufacturing Corp.