

# C EVモータの特性評価技術とEVシステムシミュレーションへの取り組み

従来のエンジンを動力とする自動車から、バッテリーとモータを動力とするxEV(電気自動車など)への置き換えが進められている<sup>1)</sup>。エネルギー性能に優れたEVを開発するために、モータの高性能化、高効率化が求められており、モータの特性(トルクなど)を知ることは非常に重要である。

EVのモータ特性を知るためには、モータベンチ試験が行われるが、ダイナモの最高回転数や最大出力トルク、インバーターの最大出力電流によって実施可能な試験の上限値が決まることが多い。そこで当社では、モータベンチ試験とモータの電磁場解析を組み合わせたモータ特性評価技術の開発を進めてきた。

また、最終的にはモータ単体の特性評価のみならず、車両に組み込んだ時のエネルギー効率、振動・騒音評価なども必要となる。これら総合的な車両評価が可能なEVシステムシミュレーションができれば、実機試験回数を低減でき、設計開発時間を短縮することが可能となる。

本報では、当社で取り組んでいるモータベンチ試験と電磁場解析を用いたモータ特性評価技術と、EVシステムシミュレーションについて紹介する。



技術本部 計算科学センター 野口 暁  
技術本部 EV・電池プロジェクト室 榎原 健男

ここでは調査対象として、EVから誘導モータを取り出して、モータ効率試験を実施した。第1図(a)に当社で調査したEV用誘導モータの写真を示す。EVから取り出す際、モータの取り付け構造、補機類の接続と冷却状況などを調査したうえでモータ効率を把握する試験方法を検討した。この検討結果をもとに150 kW大型モータベンチ装置で高回転域まで試験をおこなうために、強度面や振動面などを考慮した治具を製作し、モータベンチ装置に治具とともにモータを設置した。また、モータからの発熱によりモータ効率が悪化するため、モータ冷却状況を把握したうえで、モータ本体を水冷チラーで冷却しつつ、回転数とトルクを変更しながらパワーアナライザで電流、電圧、回転数、トルクを測定してモータ効率を求めた。

第1図(b)にモータベンチ試験より得られたモータの効率マップを示す。横軸にモータの回転数、縦軸にトルクを示している。図中の色は、グラフ右側に示すパーメータのモータ効率が示されており、濃い赤になるにつれて供給電力に対して効率良くトルクが出力されることを示している。本試験結果では、回転数500rpm、トルク40~45N・m付近(第1図(b)に示してある付近A)での効率が80%程度となっており、停止状態からの加速は良いが500rpm以下の低回転はモータ効率が良くないことがわかる。また、回転数に関わらずトルクが25~30N・m付近で92%程度と本試験範囲では高いモータ効率結果が得られた。

なお、モータ効率は一般的に回転数、トルクともに中間領域で効率が良くなる傾向があり、本モータも概略は同様の傾向が示されているが、回転4000~6000rpm、トルク12~45N・mの領域で、モータ効率の低下が見られた。これはこの領域のみモータシャフトで発生する共振等の振動問題により効率が低下したものと考えられる。モータの高回転領域での安定した駆動技術は今後重要となってくると考えられ、今後の検討項目であると考えられる。

に構造、サイズ、電磁鋼板や磁石の材料分析、コイルサイズ、エアギャップなどの調査を実施した。第3図に誘導モータの解析モデルと巻き線を示す。

誘導モータの効率特性を解析で求めるために、電磁場解析をおこなった。電源は三相電源であり、モータの定格回転数は、(4)~(5)式で表される。

$$N = \frac{120f}{P} (1 - s) \dots\dots\dots (4)$$

$$s = \frac{(N_s - N)}{N_s} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $N$  : 定格回転数[rpm]  
 $N_s$  : 同期回転数[rpm]  
 $P$  : 極数  
 $f$  : 電源周波数[Hz]  
 $s$  : すべり[-]

本解析におけるすべりは、誘導モータが安定して運転できる範囲の代表値として0.1と仮定し、(4)式より誘導モータの電源周波数を決定した。

第1図(b)に示す2条件(①回転数2000rpm、トルク15N・m、②回転数7000rpm、トルク6N・m)で解析を実施し、モータ効率を求めた結果を第1表に示す。回転数2000rpm、トルク15N・mでモータ効率78%、回転数7000rpm、トルクN・mでモータ効率77%となり、実測と比較して約10%の誤差でモータの効率特性を求めている。実測と解析の誤差に関しては、電磁鋼板の磁化特性の測定を実施しておらず、一般的に使用している磁化特性を使用しているためであると考えられ、磁化特性試験を実施することにより、さらに実測に近いモータ効率が得られると考えられる。このような解析モデルを用いて、モータベンチ試験では調査できない回転数やトルクの範囲を解析によって検討することが可能となる。

## C-1 EVモータの特性評価

### 1.1 モータベンチ試験

EVの主機に使用されるモータは、誘導モータと永久磁石モータがある。誘導モータは、ロータ部にある導体で作られたかごに2次電流が流れるため電力損失が大きい、構造が堅ろうで高回転化が容易なうえ、定出力の制御も比較的容易で安価である<sup>2)</sup>。一方、永久磁石モータは、ロータ部に永久磁石が埋め込まれており、磁石トルクによりロータが回転する原理のため、ロータ部に2次電流が発生しない分、誘導モータに比べ電力損失が少なく、省エネルギーかつ高効率である。

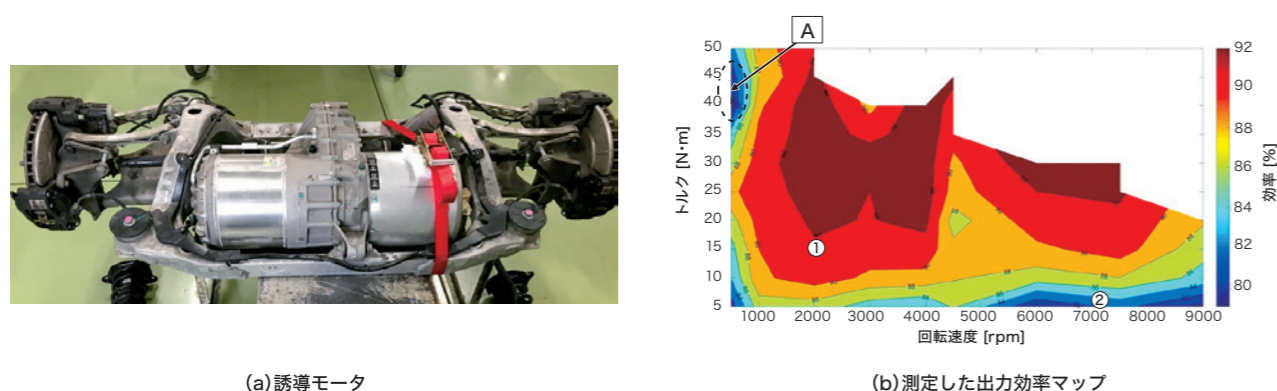
モータ特性を把握する一つの手段として、モータの効率測定がある。モータ効率は(1)式で表され、入力された電力に対する機械的な出力の比である。

$$\text{モータ効率}[\%] = \frac{\text{機械出力}[\text{W}]}{\text{入力電力}[\text{W}]} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{入力電力}[\text{W}] = \text{電流}[\text{A}] \times \text{電圧}[\text{V}] \dots\dots\dots (2)$$

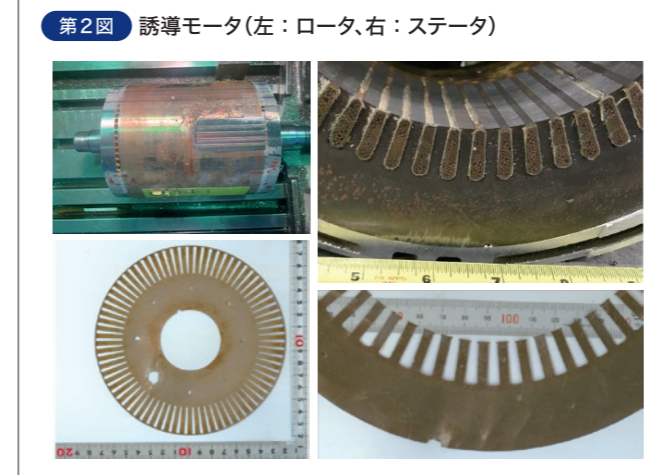
$$\text{機械出力}[\text{W}] = \text{回転速度} [\text{rad/s}] \times \text{トルク}[\text{N}\cdot\text{m}] \dots\dots (3)$$

第1図 モータベンチ試験で測定した誘導モータの効率マップ



### 1.2 モータの電磁場解析

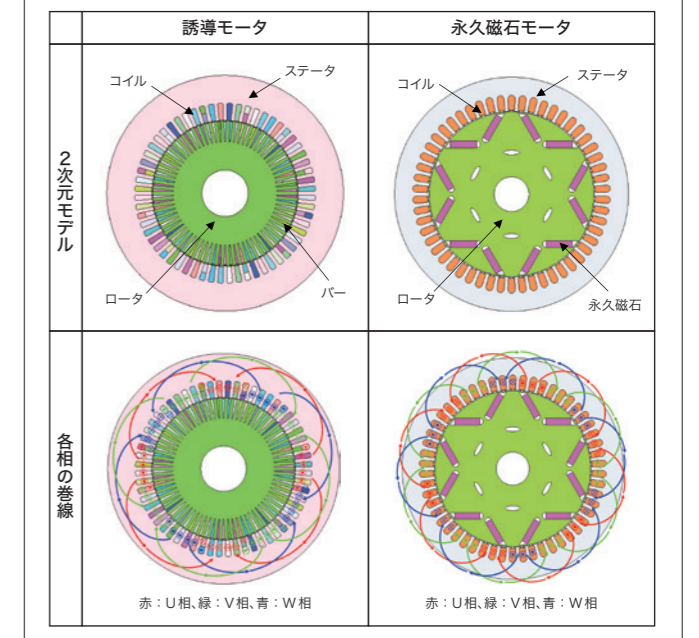
モータベンチ試験では評価できない範囲を解析で評価するために、モータベンチ試験後にモータを解体して、第2図に示すよう



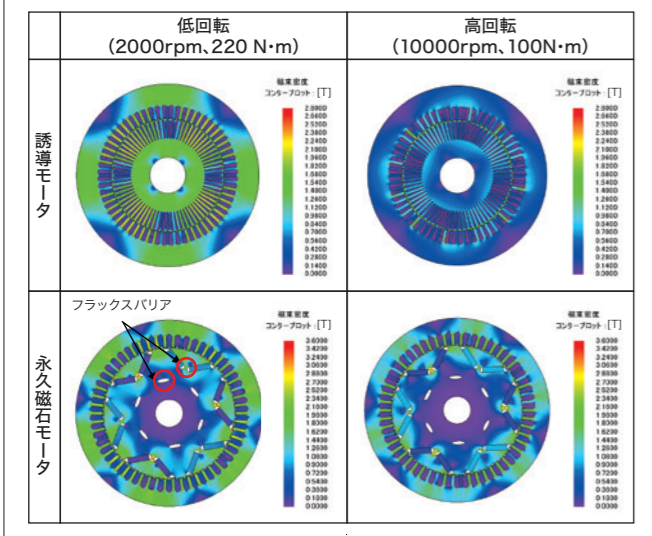
第1表 第1図(b)①、②におけるモータ効率の比較

番号	モータ効率 [%]		解析と試験との差異 [%]
	解析	試験	
①	78	91	13
②	77	83	6

第3図 誘導モータと永久磁石モータの2次元モデルと各相の巻線



第4図 磁束密度分布図

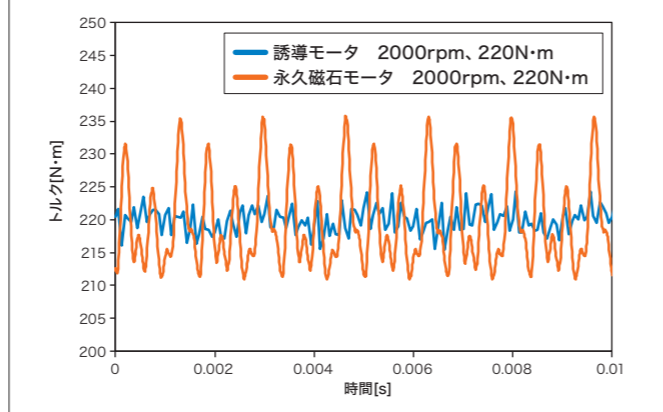


### 1.3 誘導モータと永久磁石モータの特徴

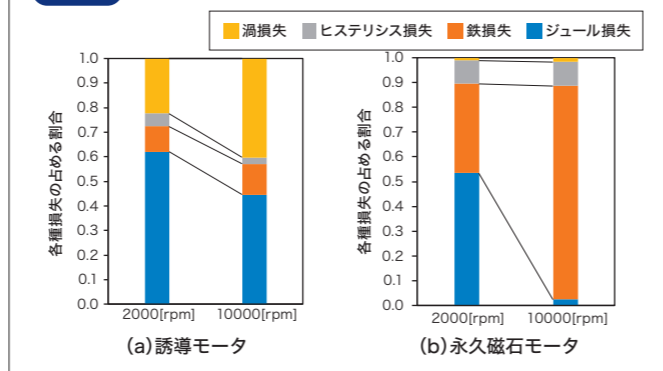
1.2節での誘導モータのモータ効率の実測と解析を比較することにより、解析のみでの評価が可能であることがわかった。そこで、誘導モータの比較対象として、モータのロータ部分に永久磁石を埋め込んだ構造を持つ永久磁石モータでの電磁場解析を実施した。永久磁石モータの断面図と巻き線を第3図に合わせて示す。モータの特性比較をするにあたり、駆動条件を低回転(回転数2000rpm、トルク220N・m)と高回転(回転数10000rpm、トルク100N・m)の2ケースとした。第4図に電磁場解析の磁束密度分布図を示す。磁束密度とは、磁場の強さに透磁率を掛けただものである。誘導モータでは、ロータ全体に磁場が生じている。一方、永久磁石モータでは、第4図の赤丸で示すフラックスバリアとよばれる楕円型の6つの空間が磁石の両端に配置されていることにより、ロータ中央部の磁場が低減されている。

第5図に回転数2000rpm、トルク220N・mにおける各モータでのトルク波形を示す。誘導モータのトルクは220N・m付近で比較的安定したトルク変動をしているが、永久磁石モータのトルクは、210~230N・mで変動している。これはコギングトルクと呼ばれる現象である。コギングトルクとは、モータの構成部品である鉄心と永久磁石の作用によって生じる抵抗であり、トルクにむらが生じてモータの高効率化を妨げるとともに、振動・騒音を発生させる原因となる。このことより、永久磁石モータより誘導モータのほうが安定したトルクが供給できることがわかる。永久磁石モータのトルク変動をおさ

第5図 2000rpm、220N・mにおけるトルク波形の比較



第6図 回転数によるモータ損失割合の変化



るためには制御方法を検討する必要があると考えられる。

第6図にモータの形式別に、回転数により変化する損失の占める割合を示す。モータの損失は渦損失、ヒステリシス損失、鉄損失、ジュール損失に分類され、これらを合計した損失である。

誘導モータは、誘導電流による2次電流がロータに流れるため、ロータが高速回転すると渦損失が増加する。一方、永久磁石モータは、コイルで生じる磁束と永久磁石の磁束が相互作用することで、ロータでは固定子スロット高調波が発生し、ステータには起磁力高調波が発生するため、ロータが高回転すると鉄損失の割合が増加する。

以上より、誘導モータは高回転・高トルクのモータに向いているが、回転子導体に2次電流が流れるために損失(熱)が発生する特徴が確認できる。一方、永久磁石モータは2次電流による損失が発生せず、より高効率な運転が可能であるが、磁石の取り付け構造上、高回転化が難しい特徴を確認することができる。

## C-2 EVシステムシミュレーションの構築

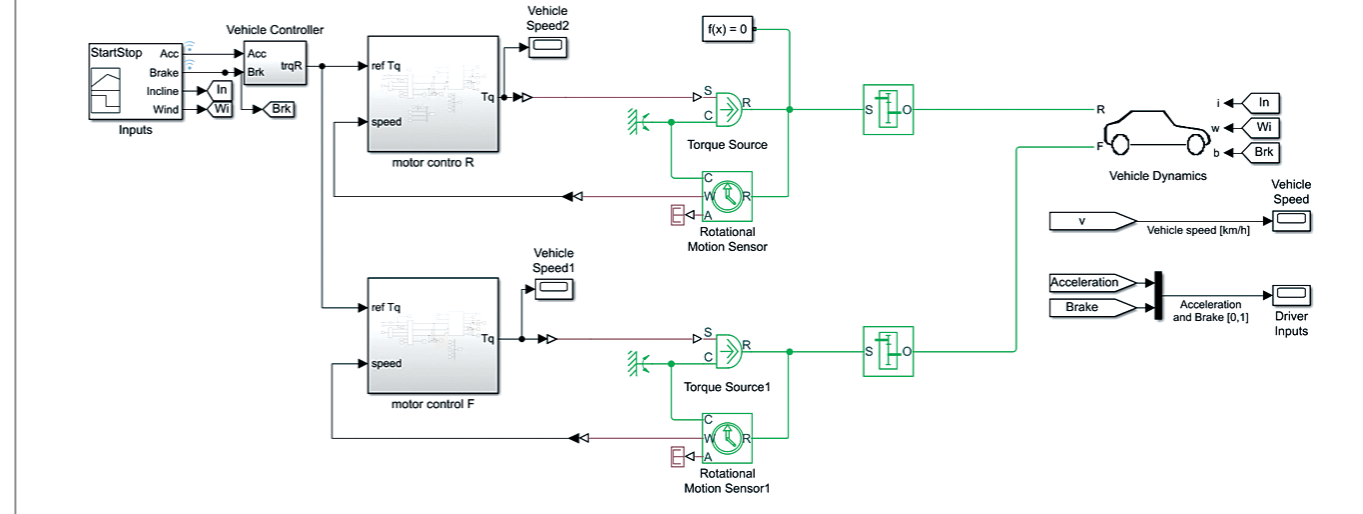
### 2.1 モータの1次元モデル化

モータの電磁場解析は、モータ単体でのトルクや効率を詳細に評価するには向いているが、解析モデルは非常に大きく、解析時間がかかるため、EVシステムの初期設計段階での評価には向いていない。

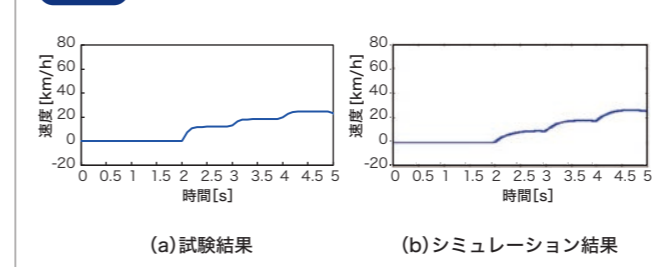
そこで、アクセル、ブレーキ、路面傾斜、風荷重を入力条件とし、EVのモータ実機特性、車体モデルなどを1次元でモデル作成す

ることで、EVシステムの評価を可能とした。例として、第7図にEV模型のシステムシミュレーションモデルを、第8図に弊社で実施したEV模型の試験結果とシミュレーション結果の速度比較を示す。本シミュレーション条件は風荷重、路面傾斜ともなしとしている。また、車体モデルは、車体の質量と重心位置を考慮したモデルとなっている。本シミュレーション結果では、加速直後の速度変化が試験結果に比べ緩やかとなっているが、定速運転時は試験結果を再現できていることを確認した。

第7図 EV模型のシステムシミュレーションモデル



第8図 試験結果とシミュレーション結果の速度比較



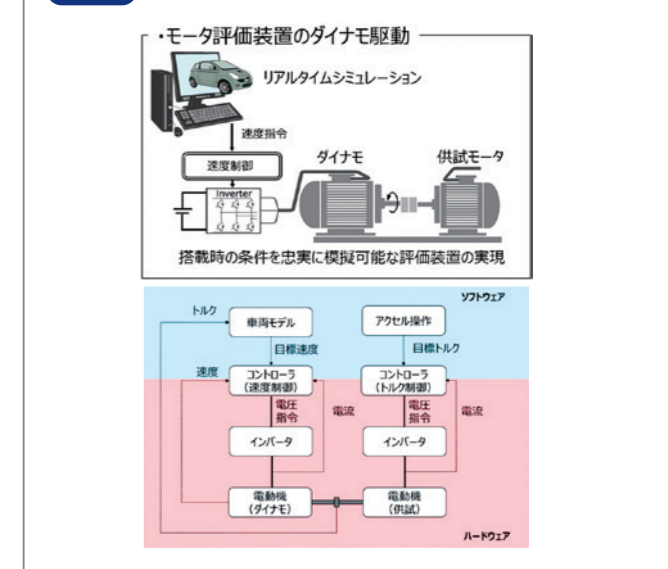
シミュレーションで加速直後の速度変化を再現するには、さらに制御方法を検討する必要がある。また、実走行での走行状態をシミュレーションで振動(乗り心地)評価するには車体のモデルの検討も必要となる。

### 2.2 モータHILSの構成例

HILS(Hardware In the Loop Simulation)とは、車のモータ性能や車両挙動を数式化(1次元モデル化)し、実機を模したリアルタイムシミュレーションが可能な開発用シミュレータを表す。車両開発におけるHILS活用のおもなメリットは、下記があげられる。

- ①モータの製作コストが大きくかかる場合において、モータの試作品を製作せずにテストが行え、試作時間の短縮とコスト削減ができる。
- ②試験条件を再現することにより、長時間のテストを実施することが可能である。

第9図 モータHILSのシステム構成の概略図



- ③制御用のソフトウェアの検証が行えるため、開発期間を大幅に短縮することが可能である。

第9図にモータHILSのシステム構成例の概略図を示す。リアルタイムに実機のモータのトルクを車両のシミュレーションモデルに取り込み、シミュレーションモデルのモータ速度を実機モデルにフィードバックするシステムとなっており、車両を製作する前にシミュレーション上で車両のモータ効率を検査することが可能である。

参考文献 \*1) 大聖泰弘：精密工学会誌, Vol.84, No.9 (2018), pp.755-760.  
\*2) 足利正：電気学会誌, Vol.117, No.1 (1997), pp.18-21.