

小型電動車用アウターロータ型ブラシレス DC モータに関する研究

作間礼揮*・松岡研二**・大泉哲哉・服部正行

Study of an Outer Rotor Type Brushless DC Motor for a Small Electric Vehicle

SAKUMA Hiroki*, MATSUOKA Kenji**, OIZUMI Tetsuya and HATTORI Masayuki

A Direct Drive (DD) type motor that has a low-speed and high-torque specifications is suitable for the driving motor of a small electric vehicle (EV). We have developed a driving motor system for an energy-saving race EV by modifying a commercial outer rotor type brushless DC motor into a low-voltage-type one. This system has an electric regenerative energy circuit using quick-charging electric double-layer capacitors (EDLC). An energy-saving EV race called the "World EV Challenge in SUGO" is held every year in Sugo (Miyagi, Japan). We participated in the EV race to evaluate the performance of this driving motor system and examined the actual running data with simulation results calculated using an equivalent electric circuit of the EV system.

Keywords: Driving motor system, Outer rotor type brushless DC motor, Electric double layer capacitor

1. はじめに

小型の電気自動車(EV)等の駆動モータとしては、バッテリー駆動であるため、低電圧で低速・高トルクのダイレクトドライブ(DD)モータが望ましい。しかし、このようなタイプのモータはあまり普及していないため入手がやや困難であるといった問題がある。そこで本研究では、市販の商用電源仕様のアウターロータ型ブラシレス DC モータを低電圧用に改造し、DD の小型 EV 用駆動モータの開発を行っている[1-3]。その際、駆動方式としては正弦波駆動に比べ回路が簡単で安価に構成することができる方形波駆動方式を用いている。

駆動モータの応用例として、電気二重層キャパシタ(EDLC)による電力回生機能を付与した、DD の競技用 EV を製作している。毎年、スポーツランド菅生で開かれる EV の燃費レース“World EV Challenge in SUGO”(エコラン)にて性能を評価するとともに、競技用 EV の電気的等価回路による走行シミュレーションとの比較からも検討を行っている[4]。エコランとは、支給される鉛バッテリー 270[Wh]を用いて、2 時間内の走行距離を競うレースである。走行コースは、周回全長約 3.7[km]、標高差 70[m]、最大登り勾配 10[%]、最大下り勾配 8.4[%]と起伏に富んでおり、一般の道路に近い条件での評価といえる。

2. 駆動モータについて

2.1 駆動モータの仕様

(1) DD (Direct Drive)モータ

本研究でまず用いたのは、東芝製のアウターロータ型ブラシレス DC モータ (DD モータ)であり、3 相 12 極 Y 結線、定格電圧 280[V]、定格電流 3[A]である。

図 1 の(a)に SPM (Surface Permanent Magnet)構造で 24 極のフェライトマグネットを使用したロータ、図 1 の(b)にステータであるコイルの写真を示す。

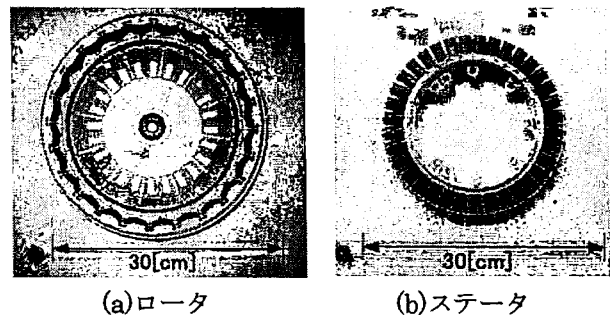


図 1 モータ写真(DD モータ)

(2) S-DD (Super Direct Drive)モータ

東芝製の同タイプの新型モータ(S-DD モータ)モータについても検討した。S-DD モータは、ロータの磁極を 2

* 本校電子システム工学専攻 2 年

** イーモビル (有)

倍にし、リラクタンストルクを併用するため高トルク化が期待でき、軽量化・コンパクト化も施されている[5]。

図2(a)にIPM (Interior Permanent Magnet)構造で48極のネオジムマグネットを使用したロータ、図2(b)にステータであるコイルの写真を示す。

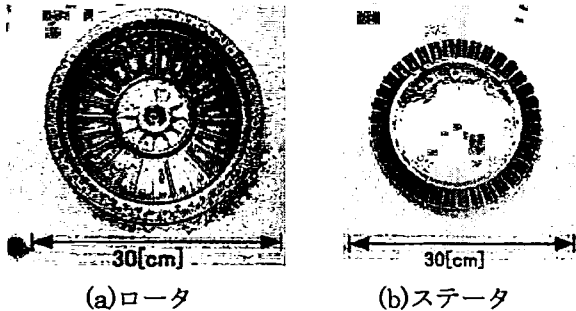


図2 新型モータ写真(S-DD モータ)

2.2 コイルの並列化

DD モータは、商用電源で駆動するため定格電圧が280[V]と高くバッテリー駆動にはあまり向いていない。したがって、48[V]の鉛バッテリーで駆動するためにはモータの低電圧化を図る必要があり、コイルを12直列から2直列・6並列に変更した。その際の500[rpm]回転時の逆起電力波形を図3に示す。図3より、逆起電力が約1/6倍になっているため48[V]のバッテリーで駆動可能であること、磁束分布がほぼ完全な正弦波分布に近く、コギングトルクの低減にもつながっていると考えられる。

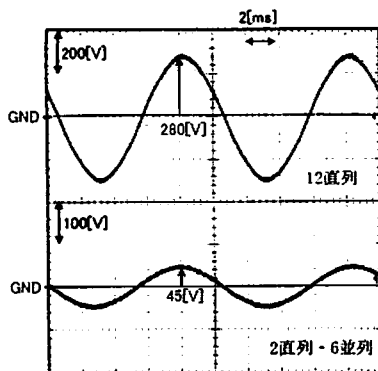
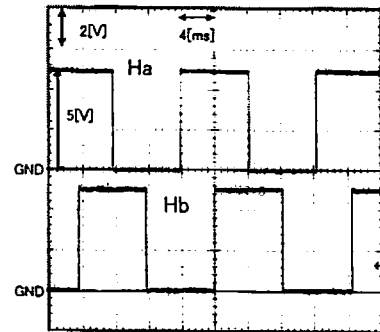


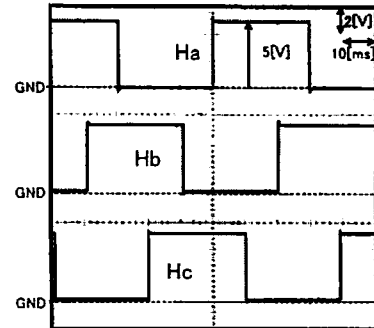
図3 モータ逆起電力波形(500[rpm]回転時)

2.3 回転角位置センサの改造

東芝製の駆動回路では、位置センサとして図4(a)に示す2個のホールセンサを用い、この信号を演算処理する正弦波駆動方式を採っている[5]。本研究では方形波駆動を行うため、ホールセンサ2個での駆動も可能ではあるが、トルク脈動やトルク不足を改善するため図4(b)に示すホールセンサを3個とした位置センサを作製した。図4(b)より、センサ出力がそれぞれほぼ $2\pi/3[\text{rad}]$ ずれており、回転角を $\pi/3[\text{rad}]$ 毎に検出できる。



(a) センサ出力(2個)



(b) センサ出力(3個)

図4 ホールセンサ出力信号

3. 回路の構成と駆動原理

3.1 モータ駆動回路の構成

モータ駆動回路の構成は図5のようになる。ホールセンサから得られるロータの位置情報と、速度指令をH8マイコンに入力し、それらの信号を基に電力変換器を動作させ、モータを駆動している。

ロータの位置は電気角で $\pi/3[\text{rad}]$ 毎に6つの領域に分けて検出し、各モータ巻線に図6のように電流が流れるよう制御している。また、電力変換器はFETにより3相インバータを構成し、インバータの通流率 h を降圧チョップにより制御している。この通流率 h とモータ印加電圧 V_m の関係は、電源電圧を V_s とすると

$$V_m = h \cdot V_s \quad (1)$$

で表わされる。したがって、負荷条件により速度は変わるが速度指令として通流率 h を与えている。

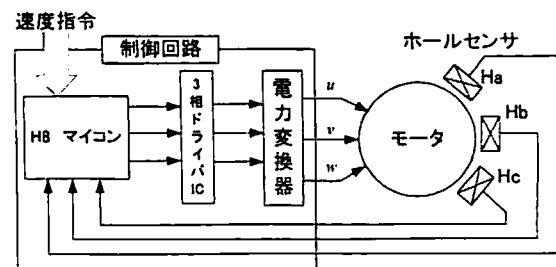


図5 モータ駆動回路の構成

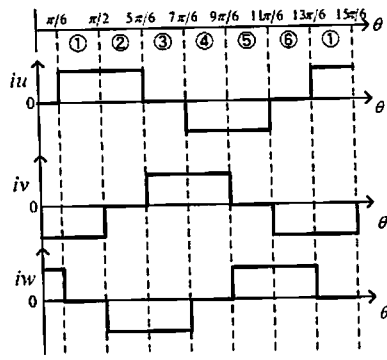


図6 各巻線の電流分布

3.2 モータの発生トルク

(1) DD モータの発生トルク

モータの発生トルク $T(\theta)$ は、ロータの永久磁石によるエアギャップ部の磁束密度分布を $B(\theta)$ 、電流を $I(\theta)$ と仮定すると、

$$T(\theta) = \sum KB(\theta)I(\theta) \quad (2)$$

で表すことができる[4]。

図6に示すように電流を流し、磁束分布 $B(\theta)$ が最大値 B_m の正弦波状であると仮定すると、発生トルク $T(\theta)$ は(2)式より求めることができる。センサ2個での駆動を行った場合の発生トルクは図7のようになる。常に正のトルクが発生しており、負荷時にも安定に動作することを確認した。しかし、トルク脈動や平均トルクの観点からセンサ3個での駆動を行うことにした。図8にセンサ3個での駆動を行った場合のトルク波形を示す。図8より、図7に比べてトルク脈動が小さいこと平均トルクが増加することがわかる。

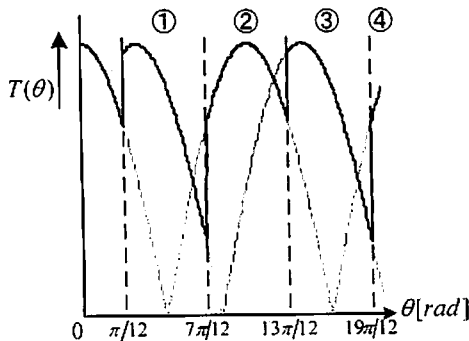


図7 ロータ回転角と発生トルクの関係(センサ2個)

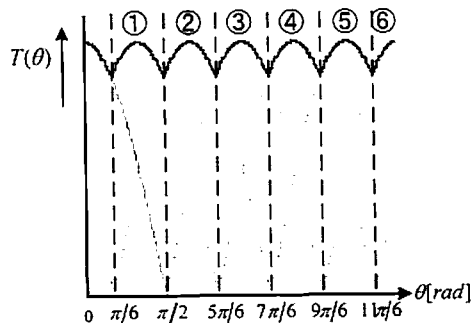


図8 ロータ回転角と発生トルクの関係(センサ3個)

(2) S-DD モータの発生トルク

S-DD モータは、IPM 構造を採用するため永久磁石により発生するマグネットトルクだけでなく、鉄の磁化作用によって発生するリラクタンストルクを併用している。リラクタンストルクとマグネットトルクの関係を図9に示す。ここでは、簡単化のためマグネットトルクとリラクタンストルクの最大値が等しいと仮定している。

従来の駆動方式では、図6からわかるように電流位相角を $-\pi/6[\text{rad}] \sim \pi/6[\text{rad}]$ の間で制御している。したがって、図9より電流位相角を負にとればトルク波形は異なるが同様の制御回路で駆動できる。

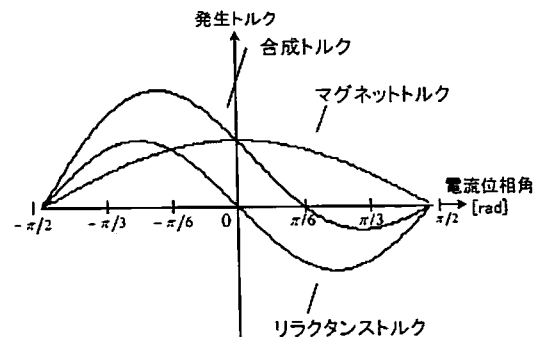


図9 電流位相角に対する発生トルク

4. 駆動特性の比較

4.1 速度-電流特性

駆動モータと負荷用のACサーボモータの軸を連結し、同方向または逆方向のトルクを与えることにより、駆動特性を測定する。また、負荷特性や回生特性を測定することにより、DD モータと S-DD モータのどちらが駆動モータとして適しているかの比較も行う。

負荷トルク T_L を 0, 2, 4[Nm] と与えた場合のモータ回転数に対する電源電流の特性を図10に示す。図10よりDD モータと S-DD モータは、ほぼ同様の特性を示している。S-DD モータを使用することにより、高トルク化を期待していたが、コイルの巻数が減り有効長も短くなっていること、トルク波形が異なることが影響し、同様の負荷特性と考えられる。

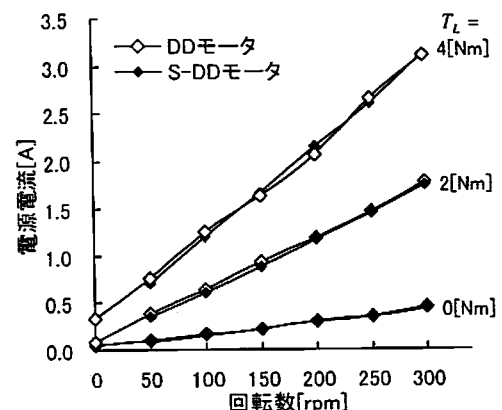


図10 速度 - 電源電流特性

4.2 EDLC を利用した駆動実験方法の提案

EV の走行距離を延ばすためには、下り坂での電力回収が重要である。したがって、駆動モータの駆動特性として負荷特性だけでなく回生特性についても評価が必要である。ここでは、電源として EDLC を利用した方法を提案する。その方法としては、一定の負荷トルク T_L を与え、回転数が一定となるよう制御した際の経過時間に対する EDLC の端子電圧を測定する。端子電圧を V 、初期電圧を V_0 、静電容量を C とすると、そのエネルギー U は、

$$U = 1/2C(V^2 - V_0^2) \quad (3)$$

で求めることができる。バッテリーではなく EDLC を利用するのは、バッテリーに比べ容量が小さく経過時間が短縮できることと、端子電圧の変化が大きいため特性の違いが判断しやすいからである。

ここで使用する EDLC は、競技用 EV に使用する鉛バッテリーが急速充電に不向きで、回生電力を有効に回収することが困難であるため、並列に接続しているものである。その諸特性を表 1 に示す。

表 1 EDLC の諸特性

	定格電圧 [V]	静電容量 [F]	内部抵抗 [mΩ]	重量 [g]
EDLC	2.5	600	6	150

表 1 からわかるように、1 個当たりの定格電圧が 2.5[V] と低いため EDLC を 32 個直列に接続し、バルクの定格電圧を 80[V]、静電容量を 18.75[F] として使用している。

負荷トルク T_L を 4[Nm]、初期電圧 V_0 を 50[V]、回転数を 100, 200, 300[rpm] と変えた際の負荷特性を図 11 に、回生特性を図 12 に示す。図 11 より、DD モータの方が同じ機械出力を発生するのに必要なエネルギーが小さいこと、図 12 から DD モータの方が同じ機械入力に対する回生エネルギーが大きいことがわかる。したがって、現在の方形波駆動方式では、DD モータの方が高効率であり、競技用 EV の駆動モータとして DD モータを用いることにした。エコランに出場した結果は、Lap9[周]、走行距離 33.3[km] であった。

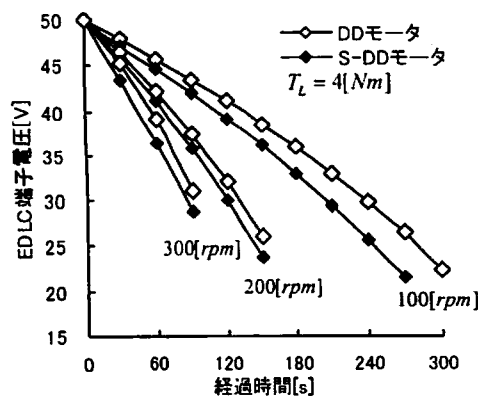


図 11 負荷特性

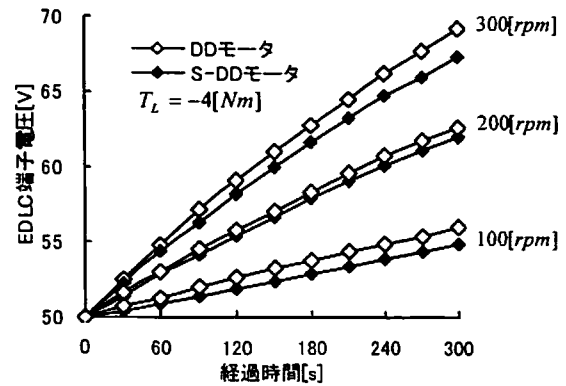


図 12 回生特性

5. 進角制御による通電位相制御

5.1 進角制御の方法

進角制御とは、コイルに対するホールセンサの位置を可変とする制御であり、それによりコイルの通電位相を制御する。通電位相を制御することにより、高負荷時に起こる誘起電圧に対する巻き線電流の遅れにより生じる駆動効率の低下を防ぐことができる。また、低負荷時や回生時には、弱め界磁による高速化が可能となる。

ここでは、ホールセンサを複数セット取り付けけた回転角位置センサを製作し、それらの信号を切り替えることにより進角を制御する。その際の進角 ϕ を図 13 のように定義する。回転方向を正にとり、基準のホールセンサ位置を 0° とする。したがって、通電位相を進める場合は負の値、通電位相を遅らせる場合は正の値となる。

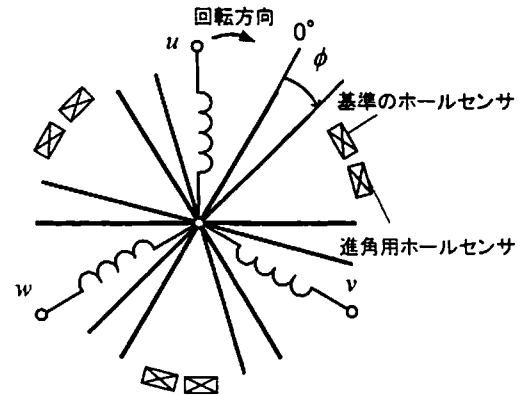


図 13 進角 ϕ の定義

5.2 進角制御による通電位相制御

進角制御用にホールセンサを 3 セット取り付けけた回転角位置センサを作製した。センサ出力信号から切り替え可能な進角 ϕ は -28° , -12° , 0° となった。

負荷トルク T_L を 0, 1.3, 2.6, 3.9, 5.1[Nm] と与え、進角 ϕ を -28° , -12° , 0° と切り替えた場合のモータ回転数に対するモータ電流の特性を図 14 に示す。図 14 より、基準のセンサである 0° のときよりも -12° とした方が電流の増加が少ない。したがって、負荷に応じた通電位相制御により、駆動効率を高めることができる。

実際に競技用 EV に搭載するには、負荷条件により自動的に進角が切り替わるようなシステムを構築する必要があると考えている。

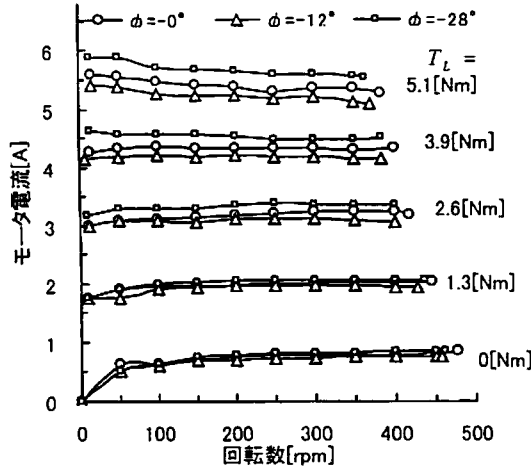


図 14 進角による負荷特性の違い

6. 競技用 EV の走行シミュレーション

6.1 駆動システムの構成

勾配 θ のコースを走行する場合の EV の構成を図 15 に示す。図 15 において、各記号を以下のように定義する。

M : 全質量 (ドライバーも含む) [kg],
 g : 重力加速度 [m/s²], μ_θ : 等価摩擦係数
 F : 推力 [N], v : 車速 [m/s], R_T : タイヤ半径 [m],
 ω_L : 回転角速度 [rad/s], T_L : 負荷トルク [Nm]
 J_L : タイヤ部の慣性モーメント [kgm²]

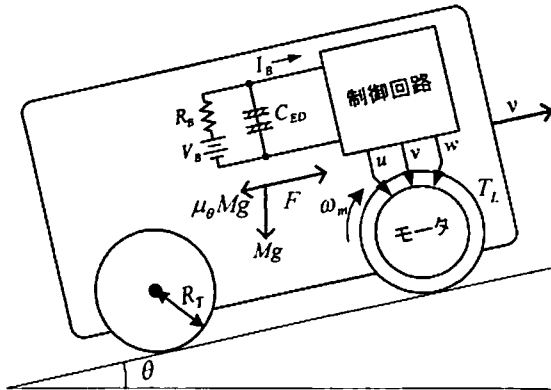


図 15 EV の駆動システム構成図

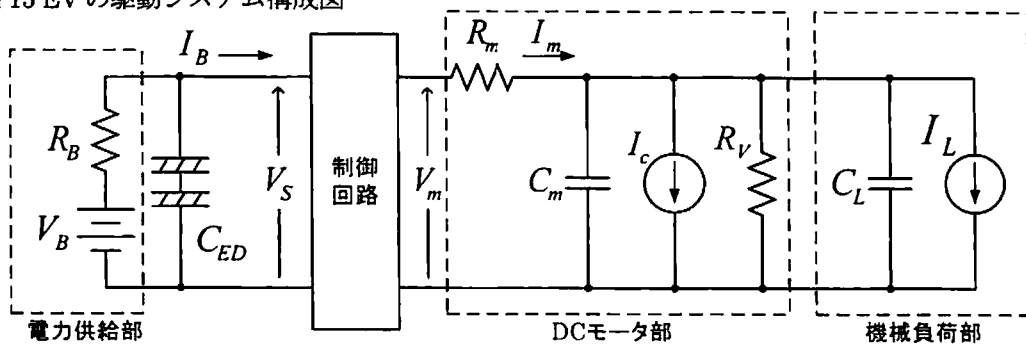


図 17 EV の駆動システム全体の電氣的等価回路

6.2 EV の駆動システムの電氣的等価回路

ブラシレス DC モータは、図 6 に示すトルク波形から等価なブラシ付き DC モータで表すと、図 16 のような整流子片 3 個のモータとなる[4]。

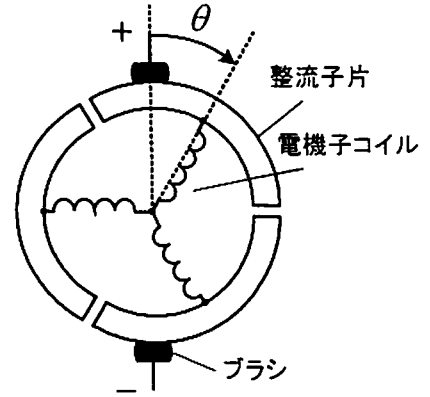


図 16 等価なブラシ付き DC モータ

したがって、図 15 のモータ部にはブラシ付き DC モータの等価回路を適用すると、EV の駆動システム全体の電氣的等価回路は図 17 のようになる。また、図 17 における各パラメータは、以下の関係式によって成立する。

$$\left. \begin{aligned} J_m / K_T K_E &= C_m [F], \\ F_c / K_T &= I_c [A], \\ K_T K_E / F_v &= R_v [\Omega], \\ (M R_T^2 + J_L) / K_T K_E &= C_L [F], \\ \mu_\theta M g R_T / K_T &= I_L [A] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4)式において、各記号を以下のように定義する。

K_T : トルク定数 [Nm/A], K_E : 逆起電力定数 [V · s/rad],
 F_c : クーロン摩擦 [Nm], F_v : 粘性摩擦係数 [Nm · s/rad],
 J_m : モータ部の慣性モーメント [kgm²]

モータの各定数は実験より求め、制御回路の損失は、モータと直列に入るためモータの電機子抵抗に含める。

6.3 走行シミュレーションと実走行データの比較

SUGO コースのスタート地点からの距離に対する標高を図 18 に示す。図 18 のようにコースを①～⑨の区間に分割し、各区間において傾斜が一定であると仮定し、走行シミュレーションを行った。また、シミュレーションなどには、進角制御の要素は含まれていない。

実走行データとしては、走行中のドライバーと携帯電話により連絡を取り、速度・バッテリー電流・バッテリー電圧のデータを取得している。この走行シミュレーションと実走行データを比較することにより、本研究で用いているシミュレーション手法の妥当性を検証する。

ある周回数でのバッテリー電流の比較結果を図 19 に示す。各区間における両者のデータがほぼ一致するという結果が得られ、このシミュレーション手法の妥当性が検証できたといえる。

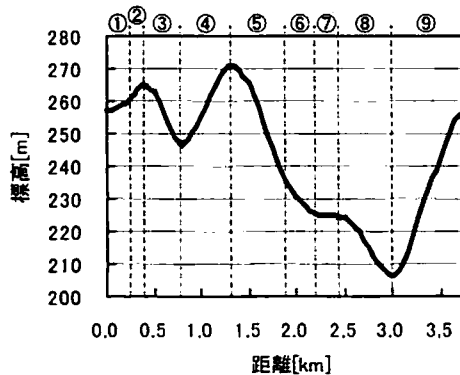


図 18 スポーツランド SUGO コース図

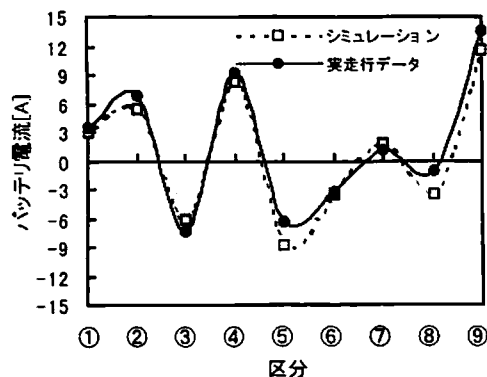


図 19 走行データの比較

7. まとめ

本研究では、市販のアウトロータ型ブラシレス DC モータを改造した駆動モータの開発を行った。さらに、新型モータの検討、EDLC を利用した駆動実験、進角制御、走行シミュレーションと実走行データの比較を行った。本研究で得られた成果を整理すると、以下のようになる。

- (1) 市販の商用電源仕様のモータを低電圧化し、回転角位置センサや駆動回路を製作し、DD の駆動モータシステムを開発した。

- (2) EDLC を利用した駆動実験方法を提案し、この方法により負荷及び回生特性の微妙な違いを評価できることを確認した。
- (3) 進角制御による通電位相制御を行うことにより、高負荷時の駆動効率の低下を抑制できることを負荷実験により確認した。
- (4) 競技用 EV の電氣的等価回路による走行シミュレーションと実際の走行データを比較し、両者がほぼ一致するという良好な結果を得た。これにより、走行前にシミュレーションより、走行データを予測することができる。

エコランでは、準備期間が短くこのモータ駆動システムの性能を十分に発揮できなかった。したがって、今後の課題としてはエコラン出場前の十分な走行試験がある。また、モータ駆動システムに関しては進角を自動的に切り替えるシステムの構築、バッテリーよりも内部抵抗の小さい EDLC に定電流充電を行う駆動システムの開発、それに合わせたシミュレーションモデルの改良などがあげられる。

謝辞

本研究の推進ならびにエコランへの出場に関しまして、種々の御配慮を戴きました本校の宮城校長先生、電子制御工学科海野学科主任をはじめとする学科の先生方に深く感謝申し上げます。また、EV の製作にあたり種々のご協力を戴きました、専攻科生の野田道広・川嶋雄介氏、卒業研究生の東竜生氏、回路製作およびその測定実験において協力戴いた専攻科生の高橋克幸氏、他協力戴いた学生諸君に深謝致します。

参考文献

- [1] 作間, 軽石, 鹿野, 堀籠, 櫻井, 大泉, 服部: 小型電動車用アウトロータ型ブラシレス DC モータに関する研究(第 1 報), 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2C7, p101(Aug.2004).
- [2] 作間, 堀籠, 松川, 櫻井, 大泉, 服部: 小型電動車用アウトロータ型ブラシレス DC モータに関する研究(第 2 報), 電気関係学会東北支部大会講演論文集, 2B3, p50(Aug.2005).
- [3] 作間, 松岡, 立花, 大泉, 服部: 小型電動車用アウトロータ型ブラシレス DC モータに関する研究(第 3 報), 電気関係学会東北支部大会講演論文集, 2D23, p151(Sep.2006).
- [4] 服部, 江頭, 大森, 大泉: ブラシレス DC モータを用いた駆動システムの開発とその評価法, 仙台電波工業高等専門学校研究紀要, No.32, pp.85-92 (Dec.2002).
- [5] 長竹和夫: 家電用モータ・インバータ技術, 日刊工業新聞社, pp.140-144(2000).
- [6] 今井, 志賀, 神田: 先端技術を駆使した洗濯機, 東芝レビュー, Vol.60 No.7(2005).