

小形電気自動車のためのアップライトイン構造を持つ

埋め込み永久磁石型同期モータの試作と評価

井村 市眞子*1 小島 稔教*2 松井 幹彦*3

A trial production and evaluation of an interior permanent magnet type synchronous motor with upright-in structure for a small electric vehicle

Shimako Imura*1 Toshiyuki Kojima*2 Mikihiko Matsui*3

From the view points of energy saving and reducing environmental pollution, the expectation for the electric vehicle(EV) is rapidly growing in recent years. This project is aiming at the development and the spread of a small EV called as a micro mover for one-person ride in a reasonable price. For its realization, the development of a specialized motor with high efficiency and reasonable price is one of the key points. Therefore, the interior permanent magnet type synchronous motor with a novel upright-in structure has been developed by a collaboration project with several venture business companies. This paper describes the outline of the prototype micro mover first. Then characteristic test results including stand still inductance measurement, lord test etc. have been shown.

1. はじめに

自動車の排出ガスによる地球温暖化や環境汚染、化石燃料の枯渇が問題となっている近年、大手自動車メーカーではガソリン車と同等の性能を持つハイブリッド車や燃料電池車の開発が盛んに推進されている。しかし、ガソリン車の代替としての高度な性能を要求すれば、价格的には高価になることが避けられない。本来、電気自動車は通勤や買い物といった生活の身近な場面で手軽に利用することで省エネルギー性・低公害性を発揮すると考えられる。そこで本研究では、手頃な価格で実用的性能を備える一人乗り用小形電気自動車の開発を目的としている。その実現のためには実用的なトルク、効率性能を備えたモータと駆動用のドライバの開発が必須となる。今回、アップライトイン構造を備えた埋め込み磁石形構造の小形電気自動車専用モータをベンチャー企業との産学協同で試作し、インダクンス、トルク、効率などのモータ特性の取得と評価を行なった。



図1 小形電気自動車試作2号機 Girasol-II 外観

2. 試作小形電気自動車 Girasol-II の概要

2.1 電気自動車の仕様

本研究で試作した小形電気自動車試作2号機 Girasol-II の外観を図1に、システム構成を図2に示す。道路交通法上は「ミニカー」に分類されるので一般公道上で運転には普通免許が必要である。

*1 東京工芸大学大学院工学研究科電子工学専攻2年在学中

*3 東京工芸大学工学部システム電子情報学科教授
2004年9月13日受理

*2 東京工芸大学工学部電子情報工学科4年在学中

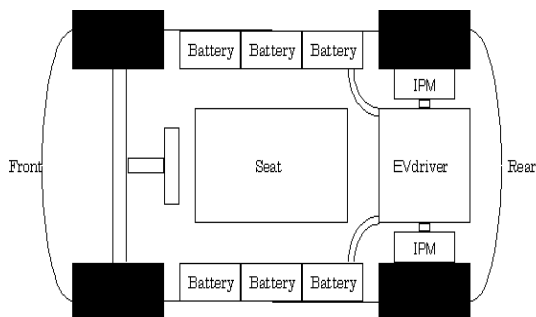


図2 小形電気自動車システム構成図

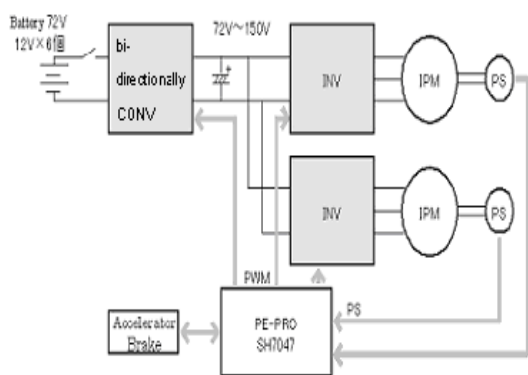


図3 ドライブシステムのブロック図

車両登録上は「原動機付自転車」と同等に扱われるため高速道路等の自動車専用道路を走行することはできないが、車検や車庫証明の必要がなく、個人でも手軽に所有することができる。乗車定員は1名に限られており、最高時速 60[km]での走行が許可されている。蓄電池には価格上の制約から性能の割に比較的安価な 12[V]の EV 用鉛蓄電池 6 本を使用しており、一回の充電で走行できる航続距離は速

度 50[km/h]で 80km 程度、30[km/h]で 100[km]程度である。表 1 に仕様をまとめる。

2.2 モータ駆動用ドライバの構成

図 3 にドライブシステムのブロック図を示す。ドライバの主回路には双方向のパワーフローが可能な昇圧チョッパ回路と PWM(パルス幅変調)インバータ回路とを組み合わせた PWM 制御/PAM(パルス振幅変調)制御併用の回路構成を採用した。これにより、40[km/h]以下での定速走行時には直流電圧を 72[V]に保ち、高速走行や追い越し加速時等、回転数の増加が必要とされる場合のみ PAM 制御を用いて直流電圧を 150[V]まで上昇させることができる。この結果、低速領域では PWM 電圧波形に含まれる高調波を抑え、モータの鉄損や銅損を軽減しドライブシステムの効率を改善できる。

しかし反面、本システムでは主回路部への双方向チョッパ回路の追加によるコスト増や電力変換損失の増加は避けられない。従って、上述の利点との得失を今後総合的に評価する必要がある。一方、PWM/PAM 制御の切り替えにより制御系は複雑となるが、コスト低減の観点からは汎用マイコンでの対処が望ましい。そこで、本システムではモータドライブ専用開発された比較的安価な制御用マイコンである日立 SH7047 ワンチップマイコンを採用した。これにより、モータ制御、バッテリー充放電制御、アクセル/ブレーキ制御等の必要機能の全てをワンチップで実現してシステムの簡素化を図ることができた。PWM/PAM 制御の切り替えは、モータに取り付けられた位置センサから回転数を検出し、その回転数に応じてチョッパ部での電圧の昇圧比を決定している[5]。

表 1 小形電気自動車 Girasol-II の仕様

車体	ミニカー	一充電走行距離[km]	約 80 (時速 50km で走行時)
寸法 全長[mm]	2000		約 100 (時速 30km で走行時)
全幅[mm]	1200	モータ形式	埋め込み磁石形同期モータ
乗車定員	1 人	モータ定格	定格出力 300W ×2 個 (最大出力 1.5kW ×2 個)
車両重量[kg]	約 330		
最高速度[km/h]	60	バッテリー	EV 用シール型鉛蓄電池
ブレーキ	4 輪ディスク/油圧		Panasonic EC-EV1260 12V ×6 個



図4 モータ外観

表2 小形電気自動車専用モータの仕様

形式	埋め込み磁石型同期モータ
極数	4
定格出力	300[W](最大出力1.5[kW])
定格回転数	500 [r/min]
重量	10.8[kg]
減速機構	遊星減速機1/5内蔵

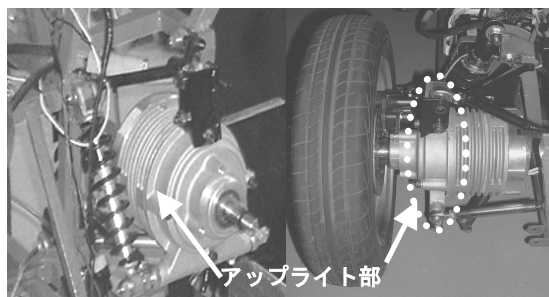


図5 車体への取り付け状況

3. 試作モータの特徴と工夫点

3.1 EV用モータの具備条件と試作モータの特徴

図4にモータ外観を、表2にモータの仕様を示す。外径21-inchのタイヤを装着して走行した際に、回転数500[r/min]で走行速度50[km/h]が出せるよう設計されている。今回、小形電気自動車専用モータを試作するに当たり、次の3点を目標とした。

- ① EVの典型的な利用状態での走行速度・トルクパターンを考慮した高効率化設計。
- ② 小形軽量化。
- ③ 取り扱いの容易さ。

これらを具現化するために、EV製作の経験が豊かな

方々の意見を取り入れながら以下の特徴を備えた仕様を決定した。

- ① 取り扱いの容易さの観点より、アップライトイン構造を採用。
- ② コンパクト化の観点より内蔵形遊星ギアを採用。
- ③ 効率的なトルク出力の観点より、埋め込み磁石形構造を採用。
- ④ アップライト部への雨水や泥の進入に備えた密閉防水構造の採用(注：デフギアを用いる従来の駆動方式ではモータを車内に配置できるため、密閉防水構造とする必要がない)。
- ⑤ 走行時の発熱の自然空冷を効率的に行なう観点より、冷却溝を進行方向に施した構造の採用(注：通常は、製作のし易さから軸方向に冷却溝を刻むのが一般的である)。
- ⑥ モータの温度管理の観点より、固定子巻線内部へのサーミスタ(温度センサ)の埋め込み。

本研究で試作した小形電気自動車Girasol-IIでは、左右後輪に本モータを搭載している。以下に、試作モータの際立った特徴であるケーシングのアップライトイン構造、およびロータの埋め込み磁石構造について、詳しく述べる。

3.2 アップライトイン構造

アップライトイン構造とは図5に示すように、車体とモータを繋ぐアームやサスペンションと、軸受けを支えるアップライト部をモータのケーシングと兼用した構造である。これによりホイールインモータと同様に車体への取り付けが容易となるのに加え、ハブの交換によりタイヤサイズが自由に選べる利点がある。またアップライト部の限られたスペースを有効活用するため、減速比5:1の遊星ギアを採用した。これまでに報告されている電気自動車専用のモータの製作事例としては、ホイールイン構造のものが多く見られる。しかし、アップライトイン構造に関してはほとんど製作事例がなく、本モータは、極めてユニークな試作例である。

3.3 埋め込み磁石型構造

図6に試作モータ(Type-B)の回転子断面の構造図とベクトル図を示す。ここで、回転子に埋め込まれた永久磁石が発生する磁束の方向に座標軸のd軸(直軸)、また、これに電氣的に直交する方向(機械的には45°の方向)をq軸(横軸)を定義する。d軸上には磁石が存在し、その厚みが等価的にエアギャップとして作用するので磁束が通りにくい。一方、q軸方向には磁束がより通り易く、これにより各軸のインダクタンスの間には $L_q > L_d$ の逆突極性の関係が成り立つ。電流位相角 β はq軸からの-d軸方向への電流進み角である[3]。

埋め込み磁石型構造の採用により、回転子の永久磁石と固定子巻線の回転磁界との吸引・反発力である「マグネットトルク成分 T_m 」に加えて、回転子磁気回路の突極性と固定子巻線の回転磁界との相互作用で生じる「リラクタンストルク成分 T_r 」の利用が可能となる。従って、全トルク T は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 T &= P_n \{ \phi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\
 &= P_n \left\{ \phi_0 I_a \cos \beta + \frac{P_n}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \\
 &= T_m + T_r \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_m &= P_n \phi_0 i_q = P_n \phi_0 I_a \cos \beta \\
 &\quad \text{マグネットトルク} \tag{2a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_r &= P_n (L_d - L_q) i_d i_q \\
 &= \frac{P_n}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \\
 &\quad \text{リラクタンストルク} \tag{2b}
 \end{aligned}$$

$I_a = \sqrt{3} I_e$: (I_e 相電流実効値)
 P_n : 極対数
 L_d : d軸インダクタンス
 L_q : q軸インダクタンス

ここで、リラクタンストルク成分を増加するためには(2b)式からも明らかなように、 L_q と L_d の値にできるだけ差がある事が条件となる。

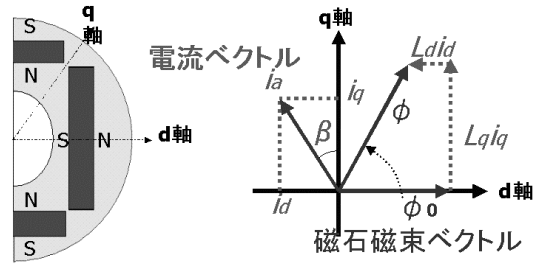


図6 回転子断面及びベクトル図

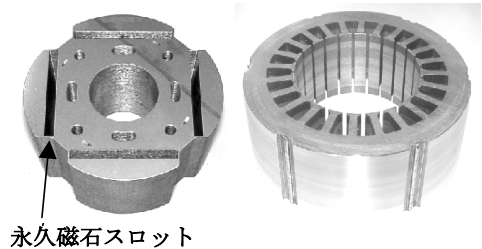


図7 ロータ(拡大)とステータの構造

図7に本モータに使用しているロータの拡大図とステータの構造図を示す。埋め込み磁石型構造を採用する事により、広い速度範囲と中速域での効率的な運転が期待できる。また、磁石を回転子に内蔵しているので高速回転での磁石の飛散などがなく保守性が高い利点がある[4],[5]。

4 試作モータの電氣的特性評価

4.1 インダクタンス特性測定試験

まず、モータの固定子巻線の1線間(U-V線間)に直流電圧を印加し、この時の回転子の静止角度をd軸インダクタンス測定角($\gamma = 0^\circ$)、これと 45° をなす角度をq軸インダクタンス測定角($\gamma = 45^\circ$)と決定する。次に同じく固定子巻線U-V線間に交流電圧を印加し、回転子の位置を回すことにより測定角 γ を $0 \sim 45^\circ$ の間で変化させて、電圧と電流よりインピーダンス Z を求める。この Z とモータの巻き線抵抗 R よりインダクタンス L を次式により算出する[3],[5]。

$$Z = \frac{V}{I} \quad \begin{array}{l} V: \text{モータ線間電圧} \\ I: \text{モータ端子電流} \end{array} \quad (3)$$

$$Z^2 = R^2 + (\omega L)^2 \quad (4)$$

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (5)$$

$R = 2r$
 r : 巻線抵抗

図 8 に測定角 γ に対するインダクタンス L の測定結果を示す。インダクタンスの最小・最大値がそれぞれ L_d と L_q に対応している。ここで、 $\gamma = 37.5^\circ$ においてインダクタンスの値が著しく減少している。これは固定子のスロット形状に起因するコギングトルクの影響が顕著に現れた結果と考えられ、特に L_q の測定結果に大きな影響を与える。そこで、実測値に離散的フーリエ変換(DFT)を施すことにより基本波成分を算出し、この基本波の最小・最大値から L_d と L_q を求める方法についても並行して行なった。図 9 に一例としてモータ端子電流 3[A] のときの離散的フーリエ変換を示す。

図 10 は、以上の方法により測定したインダクタンス値 L_d 、 L_q の電流実効値への依存性を示す。電流実効値が上昇するに伴い、 L_q の値が減少し、その結果 L_d との差が少なくなっているのがわかる。このことより、電流実効値の上昇に伴い $L_q > L_d$ の逆突極性が失われ、リラクタンストルクの効果が発揮されなくなると予想される。この主要因は、モータ内部での磁束飽和であると考えられる[1],[2]。

4.2 負荷特性試験

図 11 にモータ試験装置を示す。本モータの駆動装置として PAM/PWM 併用回路を想定しているため、バッテリー 72[V] からチョップで昇圧した後の電圧 150[V] をインバータに供給して測定を行なった。直流発電機に変換抵抗を接続して負荷電力を調整し、回転数、入力電流・電圧、モータ端子電流・電圧、電力、力率、トルクなどの値を測定することによりモータ特性を取得した。トルクはひずみ測定器の出力を換算して求めた。

外部からのアナログの入力指令に対し、実際の回転数を検出・比較して軸回転数が 500[r/min]一定となるよう調整し、 q 軸からの電流進み角 β を変

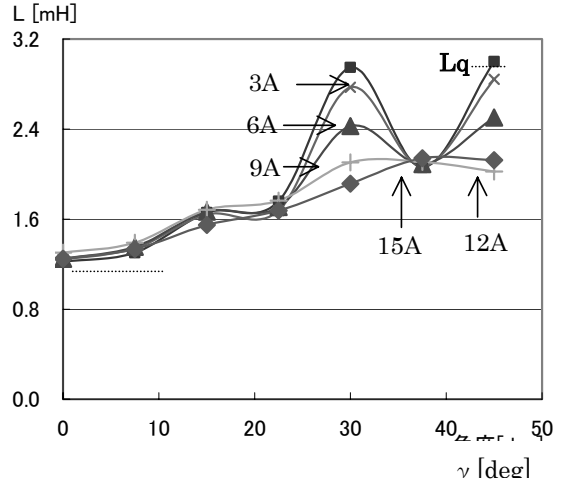


図 8 機械角に対するインダクタンスの測定

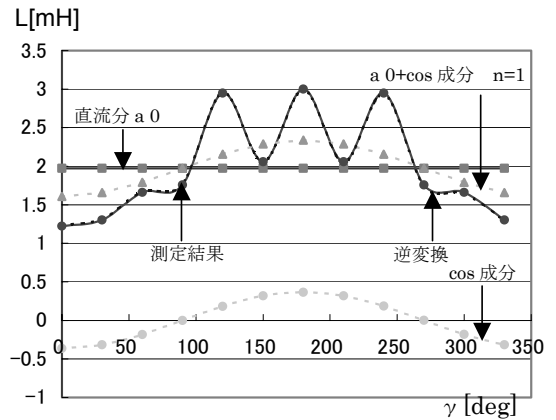


図 9 I=3A の時の離散的フーリエ変換

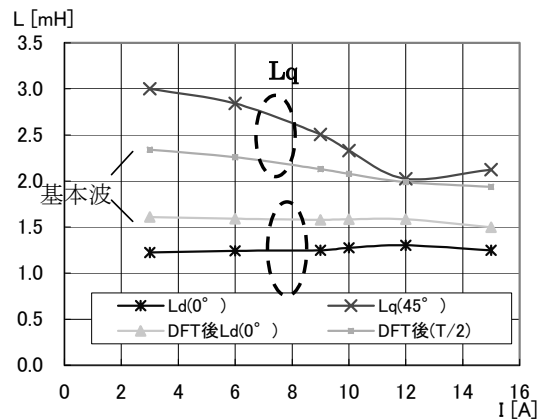


図 10 電流実効値に対する L_d と L_q の依存性

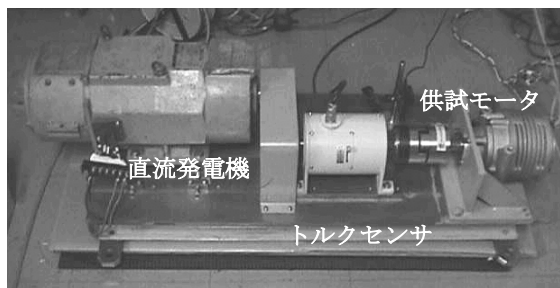


図 11 モータ試験装置

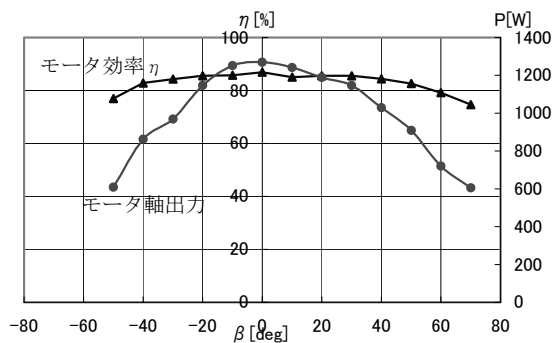


図 12 $\beta - \eta, P$ 特性

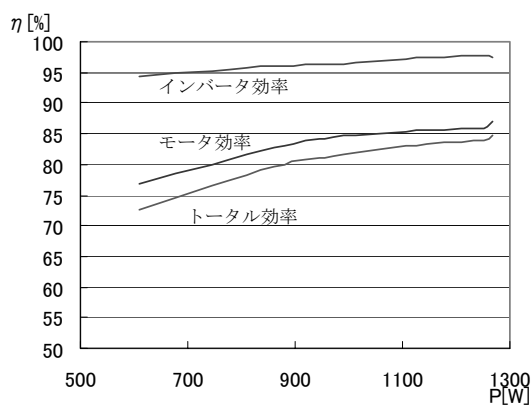


図 13 各効率と軸出力特性

化させ、モータの端子電流を 10[A] 一定に保ったときのモータ特性を取得した。

図 12 に電流位相角 β とモータ効率、出力特性の関係を示す。 $\beta=0^\circ$ を中心として β の値が正負いずれの場合にも、その絶対値の増加に伴って効率、軸出力とも低下しているのがわかる。最大効率は $\beta=0^\circ$ において 1.27[kw] 出力時に 86.9% であった。この時にモータで発生する全損失 191[W] のうち、銅損

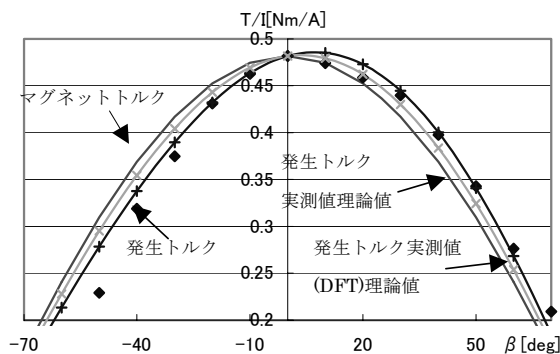


図 14 単位端子電流当りのトルクの β への依存性

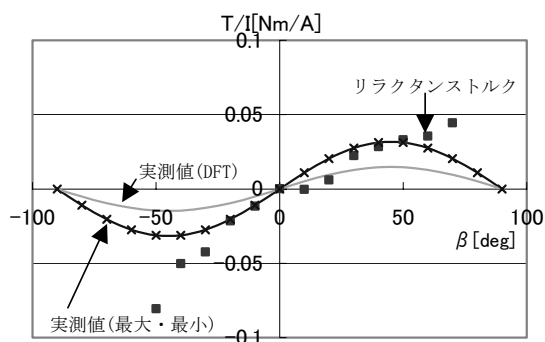


図 15 リラクタンストルク推定値の β への依存性

は 75[W] であり、全損失に占める割合は 39.3% であった。試験装置からモータを外した状態で無負荷運転した時の単体での損失 80[W] の内、銅損が占める割合は、0.82% である。両者を比較すると銅損は電流の二乗に比例するため銅損が増えたと考えられるが、鉄損等、その他の損失の詳細な内訳は不明である。

図 13 には β が正の場合の各効率と軸出力特性を示す。軸出力が上がるに伴い、効率も増加している。

図 14 に単位端子電流実効値当りの発生トルクの電流進み角 β への依存性を示す。マグネットトルクは $\cos \beta$ に比例すると考えられる。そこで、 $\beta=0^\circ$ の値を頂点として \cos 曲線を描くことにより、マグネットトルクとリラクタンストルクを推定分離することができる。発生トルクは、 $\beta=0^\circ$ の中心線に対して左右非対称となっており、リラクタンストルクの発生が観察される。

図 15 にはリラクタンストルク推定実測値の β への依存性を示す。図 10 で求めた 2 通りのインダクタンス値を用いて式(2b)より理論値を算出し、図 14 の

測定結果から推定したリラクタンストルクと比較した。その結果、推定実測値は「離散的フーリエ変換に基づくインダクタンス値」よりも「実測値の最大・最小値に基づくインダクタンス値」で計算された理論値とよりよく一致する事がわかった。しかし、 β の大きさが 50° を超えると推定実測と理論値との誤差は大きくなっている。この点については更にデータを増やして検討する必要がある。

5.まとめ

アップライトイン構造を持つ埋め込み磁石型構造の小形電気自動車用モータを開発した。主な成果は以下の通りである。

- (1) 試作モータ (Type-B) の効率は、1.27[kw]出力時 86.9%であった。
- (2) インダクタンス測定の結果より、試作モータはコギングトルクの影響が大きく、また固定子巻線に流す電流値の上昇に伴い、q 軸インダクタンスが磁路の飽和により急激に減少し、その結果 d 軸インダクタンスとの差が少なくなっていることが確認された。
- (3) 負荷トルクをマグネットトルク成分とリラクタンストルクとに推定分離した結果、試作モータではリラクタンストルクの効果は見られるものの総トルク値を増加させるまでには至っていない事、電流値の上昇に伴い磁路が飽和し、リラクタンストルクの効果が減少することがわかった。

電気自動車の場合モータ性能は走行距離等の走行性能を直接左右すると考えられる。今後はリラクタンストルクの活用によるモータの効率改善効果をより顕著にするため、磁路の飽和によるインダクタンス値の低下の影響も考慮に入れたロータ構造の設計法について検討を進める予定である。この目的のために、現在、FEM(有限要素法)に基づく汎用電磁界解析ソフトウェア J-MAG(日本総研)を利用したモータの特性解析の準備を進めている、

謝辞

本研究の一部は平成14年度東京工芸大学特別研究教育助成費の援助、並びにマイウエイ技研(株)による委託研究(平成16年度創造的中小企業振興事業「マ

イクロ電気自動車用モータコントローラの開発」における評価試験)として行なわれたものである。モータの設計試作段階でお世話になった楊仲慶氏(マイウエイ技研)、齋藤守弘氏(MST)はじめ関係各位に謝意を表す。また、試作した小形電気自動車「Girasol II」はアップライトイン構造埋め込み磁石型同期モータを搭載し、2003年8月(第5回徳島大会)・2004年8月(第6回高知大会)に開催された四国EVラリーのミニカー部門に出場した。出場に際してお世話頂いた阿部信司氏(エービーテック)、長澤雅俊氏(長澤商事)、洪遠齡氏・大矢寛氏(マイウエイ技研)はじめ関係各位にこの場をお借りして謝意を表す。

参考文献

- [1] 西尾、森本、武田「広範囲低出力運転可能な埋め込み磁石同期モータの機器定数と出力特性」平成10年電気学会産業応用部門全国大会
- [2] 電気学会技術報告第833号「応用面から見たリラクタンストルク応用電動機の開発動向」
- [3] 武田「埋め込み磁石同期モータの設計と制御」オーム社
- [4] 堀「自動車用モータ技術」日刊工業新聞社
- [5] モータ技術実用ハンドブック編集委員会編「モータ技術実用ハンドブック」日刊工業新聞社
- [6] 根崎、井村、松井、大矢、洪、阿部、長澤「ブラシレスDCモータ駆動小形低速電気自動車「ヒラソルII」の試作」電気学会半導体電力変換研究会資料 SPC-04-46, 2004