

世界に一つだけ!

トランジスタ技術増刊

ト
ラ
技

エレクトロニクス工房

No.
3

特
◎
集

モータから手作り!

電気を走りに変える
基本技術がここにある

フルクラフトEVカート

見本



● EVミニカートのスペック(A仕様)

| 項目 | スペック |
|------------|------------------------------|
| ステアリング機構 | アッカーマン方式 |
| アクセル | グリップ操作型(2輪タイプ) |
| ブレーキ | シマノ製BR-R451 |
| ホイール・ベアリング | 低摩擦シールド・ベアリング |
| タイヤ・サイズ | 16×1.50インチ |
| バッテリー | Long WP8-12(12V8Ah) |
| ホイール・ベース | 1067mm |
| トレッド | フロント660mm,リア676mm |
| 外形 | 全長1420mm, 全幅780mm,全高406mm |
| 重量 | 22.0kg(バッテリー含む) |

回転速度の制御や足回りのチューニング方法もバッチリ



*特集で紹介したEVミニカートを受注生産受付中
<http://shop.cqpub.co.jp/>

CQ出版社



第2章 モータのもつポテンシャルを引き出す

ブラシレス・モータの効率の良い回し方

内山 英和 Hidekazu Uchiyama

本章では、日本の電気自動車(EVカー)やハイブリッド・カーの市販車で一般的に使われているブラシレス・モータの特徴と回転するしくみを解説します。

カタログに書かれている100Wというモータは、何をもって100Wとっているのでしょうか。50kWモータは、100Wと比べて500倍も大きいのでしょうか。モータの巻線数や加える電圧などによって、同じ外形のモータであっても取り出せる力は大きく変化します。本章では、複雑に絡み合う各要素をていねいに解説し、EVカーの心臓部であるモータのかしこい利用を図ります。

2-1 電気自動車(EV)用の原動機としてのモータ

電気自動車(EV)用の原動機としては、どういったモータが適しているのでしょうか。一般のガソリン自動車にはたくさんのモータが使われていますが、その多くがDCブラシ・モータで、電子工作でもよく使われるマブチモーターと同じ構造をしています。

このモータはブラシという機械的の接点があるため、長時間使っていると故障します。EVカーのメインの動力が、そういう問題点を抱えていると安心して利用できませんから、ブラシを使わないモータが利用され

ます。

一般には、表2-1に示す4種類のモータが考えられます。それぞれのモータについていくつかの評価基準で優劣をつけてみました。ただし、これは見る人により差異はあるかと思えます。あくまで筆者の私見です。

▶SRM(スイッチド・リラクタンス・モータ)

スイッチド・リラクタンス・モータは、マグネットが不要になるとかロータが鉄(銅板)だけで済むので、高回転に強いメリットがあります。しかし、駆動原理からくる振動・騒音の問題、ほかのモータと比べて高回転にしないと出力密度(出力/重量)が低いなどの課題が完全に解決されていないため、EVへの採用例は

表2-1 EV用原動機の比較

EVの原動機として現状考えられるモータの優劣を比較した。ただし評価は人によって分かれる。たとえば、SRMを押し企業ではそのモータの評価は高い。そのため、参考としてみていただきたい。

| | インダクション・モータ(IM) | ブラシレス・モータ(BLM) | リラクタンス・モータ(SRM) | ブラシ付きモータ(BM) |
|----------|---|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| コスト | ○~◎ | ○ | ○ | ◎ |
| 寿命 | ◎ | ◎ | ◎ | × |
| ロータ回転強度 | ○~◎ | ○~◎ | ◎ | × |
| 動作音 | ◎ | ○~◎ | × | ×~△ |
| 効率 | △ | ◎ | ○ | × |
| モータ質量・体格 | △~○ | ◎ | △~○ | × |
| 高回転化対応 | ◎ | ○(弱め界磁による) | ◎ | × |
| 総合評価 | ○ | ◎ | △ | × |
| 備考 | ネオジム・マグネットを使用しないため、中国などの資源政策により、コストが左右されにくい。成熟した技術で長い歴史あり | 小型・軽量・高効率で現在の主流。界磁用のネオジム・マグネットの入手性、コストが課題(中国の政策など) | 最も構造が簡素で低コストのメリットがあるが、動作音の低減が困難 | シニア・カーやゴルフ・カート・レベルには適す。EV用としては不向き |

(注) IMもSRMもブラシレス・モータだが、ここでBLMとは永久磁石界磁ブラシレス同期モータを表す。

極めて少ない状況です。

▶ BM (ブラシ付きモータ)

ブラシ付きモータは低コストのメリットはありますが、それ以外は、ほかのモータに勝る要素はあまりありません。特に寿命[ブラシ&コミュテータ(整流子)の磨耗]が問題であり、ブラシの磨耗粉の問題を含めてメンテナンス・フリーとはなりにくいのが最大の欠点です。

また、回生機能を使おうとする場合も機構的に不利であり、極低速域での特殊な用途(たとえばゴルフ・カートやシニア・カー)以外への展開はまずないと考えられます。

海外製のブラシ付きモータを使って軽自動車用をEVにコンバートされている方も多のですが、これは、ほかに適当なモータがないという事情からの採用だと思えます。防水・防塵性を考慮すると、量産車への展開はないと考えます。

▶ IM (インダクション・モータ)

現状ではEV用途として、インダクション・モータ(IM)とブラシレス・モータ(BLM)のどちらかの選択になると思います。

この二つのモータは、現状では両方とも採用されていますが、状況は後者が主流です。理由は、効率と制御性(回生制御含めて)の高さが一番大きいと思われる。前者の採用例で代表的なものにテスラロードスター(USA)があります。日本国内の市販EVは、ほとんど後者のブラシレス・モータです。

▶ ブラシレス・モータ (BLM)

ブラシレス・モータに関する書籍や情報は、すでに世の中にたくさんあります。正直いって「いまさらモータに関する解説を書いても…」という思いもあります。しかし、専門書は難しすぎるものが多く雑誌情

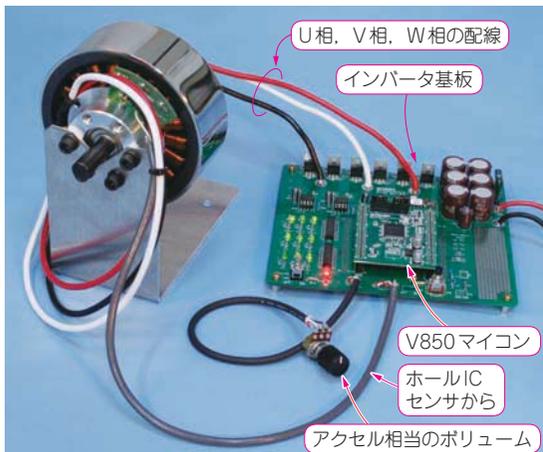


写真2-1 学習用CQ ブラシレス・モータ&インバータ・キットの完成状態

報では物足りない、そういった声も聞きます。

そこで、ここでは写真2-1に示すCQ出版社の「CQ ブラシレス・モータ&インバータ・キット」[製造は(株)ミツバ SCR+プロジェクト](以下モータ・キット)を題材として、初心者にはできるだけわかりやすいモータの解説をしようと思います。

ブラシレス・モータは、極数や磁石の数が異なっても、動作原理や電流を流す基本タイミングは同じなので、ここで説明に用いている以外のブラシレス・モータでも、動作を把握しチューナップする方法がわかると思います。

2-2 ブラシレス・モータの構造

一口にブラシレス・モータといっても、その形にはいろいろあります。まずは全体の部品構成を図2-1に示します。

図2-1は、よく説明に使われるモータの形と異なっています。一般的なのは内側が回るインナ・ロータ形式です。本章で説明しているモータはアウト・ロータ形式と呼ばれるブラシレス・モータです。アウト・ロータとはロータ(界磁子:マグネット=磁石)が電機子(コイル=銅線を巻いたところ)の外側で回転するものです。

外側にあつて回転するロータは、ヨーク(継鉄)とその内側に接着されたマグネットと中心の軸である

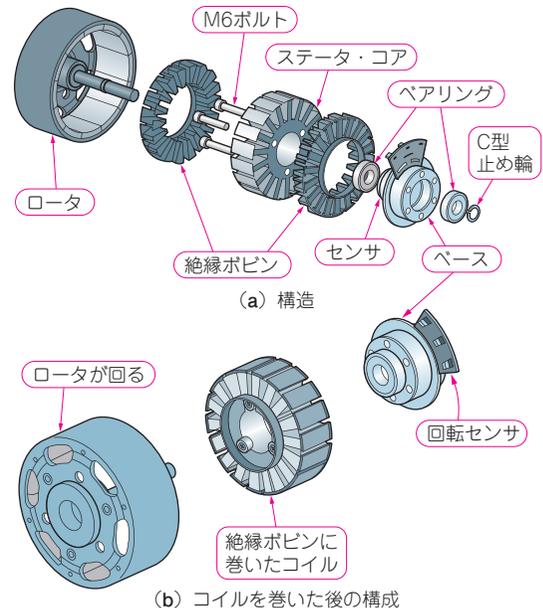


図2-1 キット・モータの構成

このキットでは、アウト・ロータ形式。マグネットはフェライトを使っている。アウト・ロータ形式のモータは手巻きしやすい。もちろん、量産時は専用機で巻線する。

られるメリットがあります。

これらのEV駆動制御は、高性能な素子やそれを活用する制御技術(ベクトル制御)が開発された結果普及してきたもので、200年と言われるモータの歴史であっても技術は今なお進化し続けています。

2-5 モータのチューニング

ここまでのモータに関する基礎的な説明で、どのようにブラシレス・モータが回るかがわかってきたところで、ここからは、目的に合った実力を発揮するための説明をします。

モータは同じ構成パーツで製作しても、電圧や巻線仕様(線径、巻数)などの諸パラメータを変えることで、その特性を大きく変化させられます。やみくもに変更しては目的の場所にたどり着けませんから、

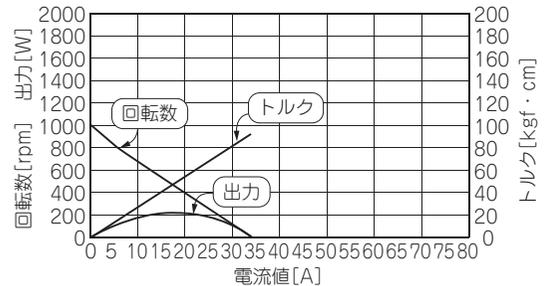


図2-17 ベースとなるモータ特性
この特性のモータをベースに考えていく。

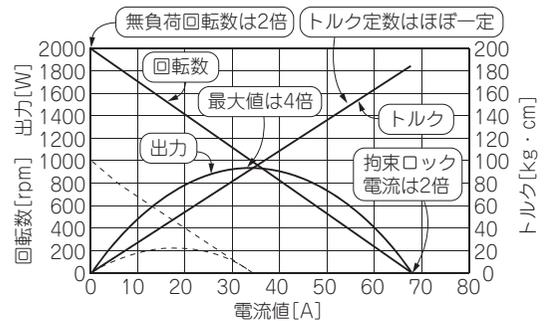


図2-18 電圧を変えた場合の特性変化
電圧を2倍にするとトルク定数は同じ、無負荷回転数と拘束電流は2倍、最大出力は4倍のモータに変化する

注1：ここではあくまで理想的、理論上での話をしている。実際は高負荷領域(高電流域)ではコイル温度上昇により上記のような特性の平行移動は崩れてくるし、トルクも飽和傾向を示すのが一般的。また、コイルのインダクタンスの影響で回転数変化も直線ではなく下に曲がったカーブになる。しかし、実際のモータ使用領域(定格領域)ではほぼこの法則が成立する。電圧を上げて使う場合はコイル電流増加によるコイル発熱に注意が必要。電圧アップ時はコイルに風を当てるなどの冷却も考慮する。

ここではその基本的な変化のルールを説明します。

これが理解できれば、いろいろな試作目的に合ったオリジナルなモータに変身させることができます。キット・モータを題材に説明します。

(1) 電圧を変える

はじめにモータの電圧を変えた場合の特性変化を説明します。図2-17はベースのモータ特性です。このモータを2倍の電圧で駆動した場合、特性は図2-18のように変化します。

ポイントは、

- ① 無負荷回転数が2倍になる。
(注) 負荷時の回転数が2倍になるのではない。
- ② 拘束電流(ロック電流)が2倍になる。
(注) 電圧が2倍なので電流も2倍。つまり最大入力電力は4倍になる。
- ③ トルク定数はほぼ同じ。
- ④ ロック・トルクは計算上2倍になる。
- ⑤ 最大出力は4倍になる。

これを一般化すると、図2-19と図2-20の変化になります^(注1)。

【まとめ】

- ① $I-N$ 、 $T-N$ 特性カーブは平行移動する。
- ② トルク定数(トルク/電流)は一定である。
- ③ 最大トルクは(計算上は)電圧に比例する。
- ④ 最大出力は(計算上は)電圧の2乗に比例する。

(2) コイルの巻数を変える

次に、コイルの巻数を変えた場合の特性変化について説明します。ここでも図2-17の特性のモータで考

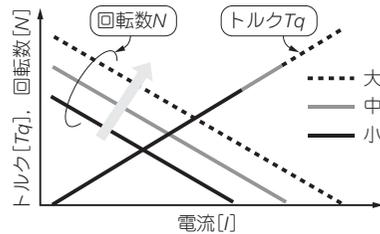


図2-19 電圧を変えたときの特性変化(電流基準)
 $N-I$ 特性は平行移動、 $Tq-I$ 特性すなわちトルク定数は変わらない。

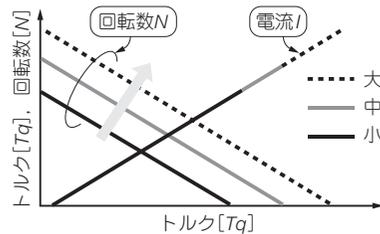


図2-20 電圧を変えたときの特性変化(トルク基準)
 $N-Tq$ 特性は平行移動、 $I-Tq$ 特性すなわちトルク定数は変わらない。

えます。

このモータのコイル巻数を半分にする、特性は図2-21のように変化します。ここで線径は同じとします。

ポイントは、

- ① 無負荷回転数は2倍になる。
- ② 拘束電流も2倍になる。
- ③ トルク定数は1/2になる。
- ④ 最大トルク（ロック・トルク）は同じ。
- ⑤ 最大出力は2倍になる。

しかし、よく考えてください。コイル巻数が半分ということは、コアのコイル巻線スペースも半分になっていますね。つまり、コアにはもっと太いコイルが巻けるはず。半分空いたスペースを使うと、コイルの断面積は2倍にできるはず。そうすると、コイル断面積が2倍になるので、その抵抗値は半分になります。

つまり巻数半分で1/2、断面積2倍で1/2、両方で1/4の抵抗値になります。すなわち、モータの拘束電流は元の4倍になります。その結果、モータ特性は、図2-22のように変化します。

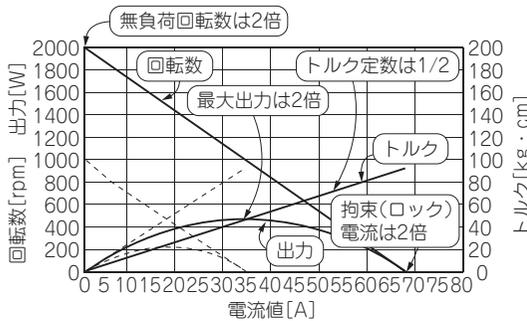


図2-21 コイル線径は同じで巻数1/2の特性
巻数を半分にする、無負荷回転数、拘束電流、最大出力は2倍に、トルク定数は半分になる。

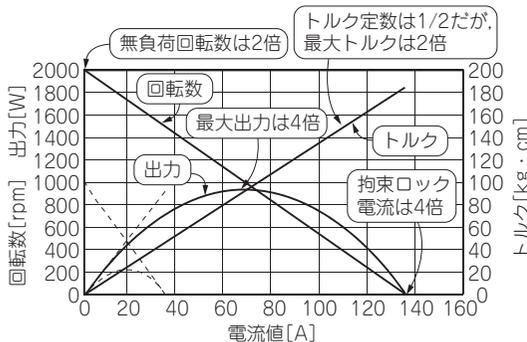


図2-22 コイル断面積2倍で巻数1/2の特性
巻数を半分、コイル断面積を2倍にするとトルク定数は半分、無負荷回転数は2倍、拘束電流と最大出力は4倍のモータに変化する。

これまた、電圧2倍のときと同じく、元の4倍の出力をもったモータに変化します。

発熱に関してはどうでしょうか？ 電圧2倍時は電流2倍ですから、コイル発熱（ジュール損）は4倍、巻数半分では電流4倍ですが、コイルの抵抗は1/4になりますからジュール損は同じく4倍になります。つまり発熱は同じことになります。

ここで重要なことがわかります。

電圧2倍と巻数半分のT-N特性は同じ

このことは大変重要です。モータを設計する場合、実は電圧は関係ないのです（ちょっと極論ですが）。

つまり24V仕様のモータがあった場合、同じ特性（T-N）は12Vでも何Vでも作れるのです。しかも電圧を変えても発熱・効率は変わらないものになります。

では巻数を2倍にしたら…これはもう説明不要でしょう。先の例と逆に考えればよいことになります。みなさん、絵に描いて考えてみてください。24V仕様のモータを12Vで実現したい場合は巻数を半分、逆の場合は巻数を2倍にすればよいことになります。わかりやすいですね。さて、ここでも上記特性変化について一般化すると、図2-23と図2-24のようになります。

【まとめ】

- ① I-N特性カーブは平行移動する。
- ② トルク定数（トルク/電流）は巻数に比例する。
- ③ 最大トルクは同じになる。
- ④ 最大出力は巻数に反比例する。

※線径が同じ場合

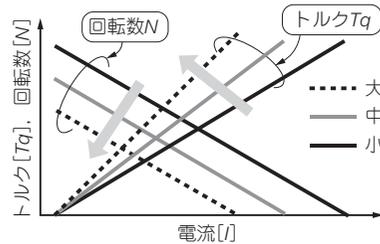


図2-23 巻数を変えた場合の特性変化（電流基準）
N/I特性は平行移動、トルク定数は巻数に比例するように変化する。

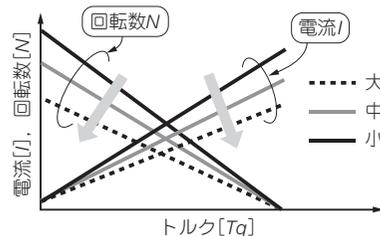


図2-24 巻数を変えた場合の特性変化（トルク基準）
巻数を増やすと低回転・高トルク型に変化する。

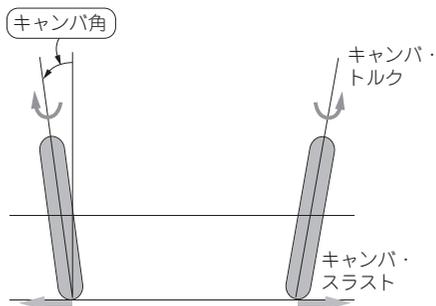


図3-11 キャンバ角とキャンバ・スラストの関係
 キャンバ方向に傾きながら直進するタイヤには、傾いている向きに力が働く。この力のことをキャンバ・スラストという。

軸が左右に取り付けられ、ハンドルはナックル・アームを通して切られます。この場合、構造は複雑ですが、前輪アライメントの調整が比較的楽であり、ハンドルを大きく切った場合でも、左右の車輪が前後に大きく動くことはありません。

しかし、左右の車輪の切れ角を内側では大きく、外側では小さくする、リンクを利用した「アッカーマン幾何学」を満足する機構にするのが一般的です。キット・カートでは写真のようにトレッド・ホイール・ベースが短いことや、最高速度が遅いので、調整の安易さから、ほぼ平行リンクに近い状態にしています。

● 走行性能の向上と安定性の追求

また、一見して真っ直ぐに取り付けてあるように見えるタイヤも、実際にはステアリング機構に対して、



写真3-4 キャンバ角の調整のようす
 キット・カートでは、ボール軸受けの部分の取り付け長さを調整して、キャンバ角を自由につけることができる。

様々な角度をもって取り付けてあります。このタイヤに与えられた幾何学的な角度のことを、ホイール・アライメントと呼んでいます。これらは、走行安定性を良くしたり、直進性を良くしたり、ハンドル操作を軽くしたいなどから、ほとんどの車両が採用しています。

このホイール・アライメントは、路面や車体に対する車輪の相対角で、前に出てきたようにキング・ピン傾角、トーイン、キャンバ、キャスタの4種類があります。

(1) キング・ピン・アングルとキャンバ・アングルの調整

キング・ピン傾角とキャンバ角により生まれる、キング・ピン・オフセットにより、ハンドリング特性や走行時の走行特性が変化します(図3-11)。キット・カートではキング・ピン・オフセットは0になるよう

コラム3-2 アッカーマン機構の成立のさせ方

速度が極端なくらい遅いか、ゆるやかな旋回するときには、遠心力が働かないので、すべての車輪が横滑りをしないで進みます。ですから、遅い速度の車や高速コーナリングを求められない車では必要ないのですが、よりスムーズな走行をするためには、図3-Aのようにすべての車輪が、ある1点を中心にして旋回することが求められます。

そのとき、図中のA点はその中心であり、前輪はそれぞれに切れ角が異なり、それぞれの車軸はA点に向かうように切られることが条件になります。そのことを満足するには、破線のように前輪の回転する軸(キング・ピン)B、Cから0点に向かうようにナックル・アームを破線上に傾けなければなりません。

この0点の位置は、トレッドやホイール・ベースによって違いますが、まずは後車軸上の中心に0点を取り、ナックル・アームの傾きを決め、図上で左

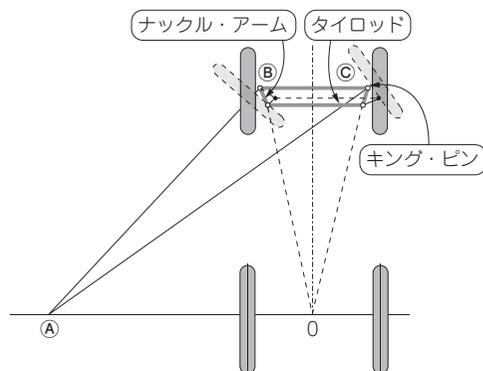


図3-A アッカーマン・ステアリングの幾何学なくみ

右の切れ角を調べながら、最適傾き角を探して決めます。

に考えています。また、写真3-4のように、前輪車軸の軸受けの取り付け長さを変更することで、それらの角度を自由に検証できる構造になっています。

(2) キャンバとトーインの調整

キャンバ・スラストだけが作用すると、タイヤは常に外側に押し出しながら走行することになり、タイヤが早く摩耗することになります。また、スキーのように前輪の先端、つま先を内側に向けると接地点には内側に向けてコーナリング・フォースが発生します。このとき、同時につま先を外へ向かせようとするセルフ・アライニング・トルクが発生することにもなります(図3-12)。つまり、与えられたキャンバ角によるキャンバ・スラストと同じ大きさのコーナリング・フォースをトーインによって与えれば、タイヤの接地点での横方向の力は消えることになります。

キット・カートでは、このトーインの調整を写真3-5のように、ハンドルからナックル・アームに渡した左右のドラック・ロッドにより調整します。

(3) キャスタ効果について

キャスタは、タイヤの接地点をハンドリング軸の後方にもってくるため、ブレーキ力、舵を切ることによって発生する、コーナリング・フォース(タイヤか

らの横方向の力)が作用すると、自動的にハンドルを戻そうとする働きをしてくれます。

キット・カートでは写真3-6のように、前輪車軸の取り付け軸受けの取り付け穴を傾ける方法を採用しています。

また、上記のいずれの場合も、ドライバが乗車するとフレームが変形し、車輪のアライメントは変わるので、組み立て時に調整ができるようにしてあります。このキットの最大の利点は学習としてこれらの、自動車にとって大切な項目が実験により理解できることにあります。

また、自動車のサスペンション装置も重要な要素ではありますが、それを採用することにより、さらにここまで説明した多くの要素の関係が複雑になり、理解されずらいと考え、キット・カートではサスペンション装置は採用していません。鈴鹿で行われるソーラ・カー・レースなどでは、高校生を含む様々な方々が挑戦しています。今後自分で製作するときには、ぜひ、サスペンション装置を取り入れてみてください。

● モータと減速装置について

モータの容量や特性については、キット・カートではCQブラシレス・モータ&インバータ・キットのモータに限定しています。写真3-7のようにモータ・ベースを後輪車軸に付け、伝達ロスを少なくする工夫をしています。

チェーンの張り過ぎや大きなたるみ、スプロケット・ギヤのみぞすり運動などは、伝える力を弱める作用があります。そのため、スムーズに回転できるように、取り付けには注意する必要があります。

また、チェーンを使って動力を伝える場合には、チェーンは伸びることも計算にいれて、スプロケットとスプロケットのあいだの距離(軸間距離)を、チェーンの長さに合わせないとチェーンがたるみます。チェーンのたるみは、チェーンはずれの原因となるの

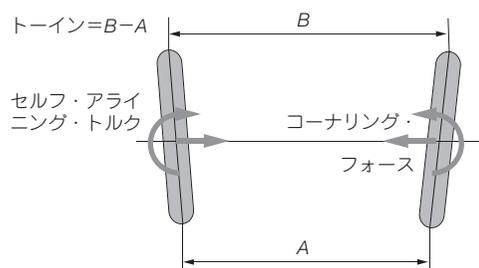


図3-12 トーインとコーナリング・フォースの関係
トーインは、ちょうどスキーのボーゲンのようなもの。効果はスキーとよく似ていて、直進性(方向性)が良くなる反面、抵抗が増える。また、キャンバ・スラストでこの抵抗は軽減される。

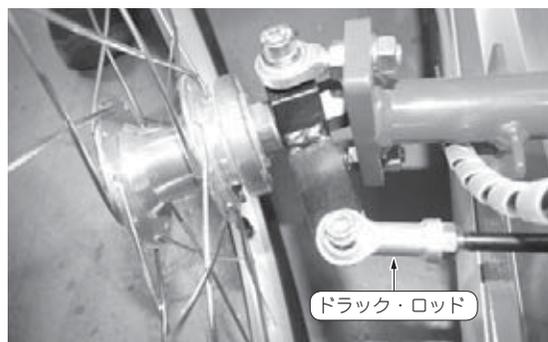


写真3-5 ドラック・ロッドとトーイン調整
左右のドラック・ロッドのピロ・ボールのねじ部の取り付け長さを調整して、トーの調整をする。トーはほぼ0からマイナスに調整する。

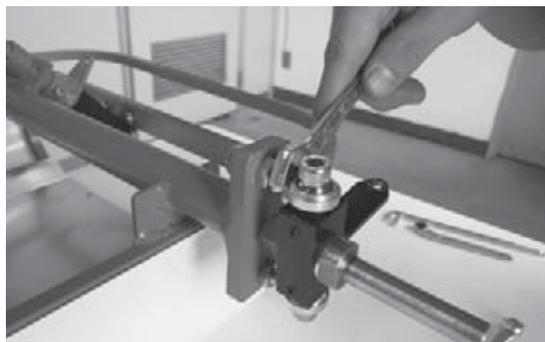


写真3-6 キャスタ角を取って穴加工した前輪取り付け部
キット・カートは、ボール軸受け部の取り付け穴をキャスタ効果のために上下でずらしている。

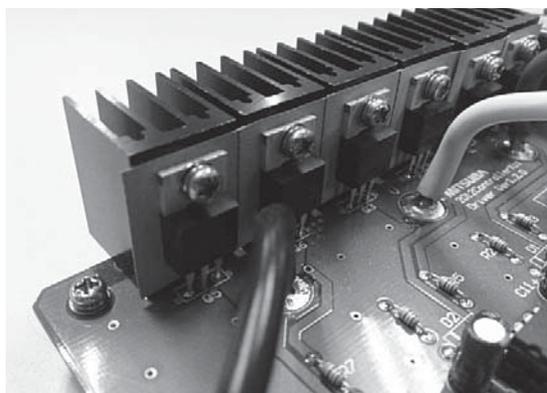


写真4-1 ヒートシンクの実装例
ヒートシンクは水谷電機工業製 [PUG16-25] を使用。

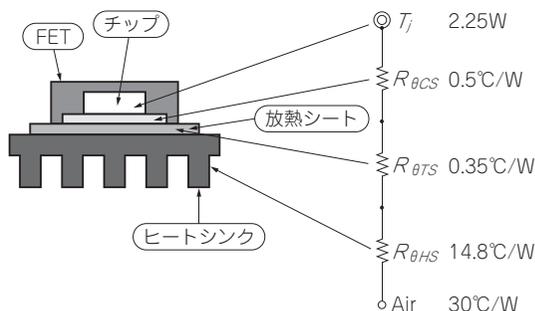


図4-8 ヒートシンク放熱モデル
FET、熱伝導シート、ヒートシンクの熱抵抗を直列に接続した抵抗とし、電気回路モデルのように考え、計算することができる。『温度上昇=熱抵抗×電力損失』となる。

④ 損失の計算例

例として、下記条件での損失の計算をしてみます。

電源電圧 $V_s=24V$ 、モータ電流 $I_m=10A$
 FET オン抵抗 $R_{on}=12m\Omega$ 、PWM周波数 $f=20kHz$
 DUTY比 $DUTY=0.8$ (80%)
 ターン・オン時間 $t_{on}=200ns$
 ターン・オフ時間 $t_{off}=166ns$
 ダイオード順方向電圧 $V_f=0.5V$
 $P_1=12 \times 0.001 \times 10^2 \times 0.8=0.96W$
 $P_2=1/6 \times 24 \times 10 \times (200+166) \times 10^{-9} \times 20 \times 10^3$
 $=0.29W$
 $P_3=10 \times 0.5 \times (1-0.8)=1W$
 $P=P_1+P_2+P_3=2.25W$

● 発熱の計算

モータの損失が発熱に変わることは前項で述べましたが、ここではFETのジャンクション(接合部)温度を計算で求めてみます。発熱は各部品の熱抵抗を使うと求めることができます。FETのデータシートを参照すると熱抵抗が記載されているので、それを使って温度を求めます。

本キットで使用しているFET (IRFZ48VPBF) の空気への熱抵抗は、データシートより $R_{\theta JA}=62°C/W$ となっています。前項の計算例で求めたFETの損失 $P=2.25W$ 時の温度上昇値 ΔT は下式のようになります。

$$\Delta T=2.25 \times 62=139.5°C$$

仮に30°C 雰囲気中でこの損失が発生した場合、FETのジャンクション温度は $139.5+30=169.5°C$ となります。

IRFZ48VPBFの動作ジャンクション温度は175°C までとなっているので、ぎりぎり大丈夫という計算結果となりましたが、これ以上電流を増やしていくと故障する可能性があります。

◆ より電流を流すには

では、もっと電流を流すためにはどうしたらよいでしょう。よく見られる手法として、FETにヒートシンクを取り付けて効率よく熱を逃がすという方法があります。キットでは水谷電機工業製 [PUG16-25] (16.2×20×25mm) が取り付けられるような設計となっているので、このヒートシンクを使った場合の計算例を紹介します(写真4-1)。

このヒートシンクの熱抵抗は、カタログ値より14.8°C/Wになります。FETにヒートシンクを取り付ける場合、FETの放熱フィンとヒートシンクの間に微小ですが隙間が生じます。空気は非常に熱抵抗が高いため、その隙間を埋めるために、シリコン・グリスや熱伝導シートなどを一般的に使用しています。今回は0.35°C/Wのシートを使用しました。この場合の熱抵抗モデルは、図4-8のようになります。

このモデルから、損失2.25Wで30°C 雰囲気でのFETのジャンクション温度 T_j は、下式で求められます。

$$T_j=(0.5+0.35+14.8) \times 2.25+30=65.2°C$$

ヒートシンクを取り付けることにより100°C 以上温度が下がり、より多くの損失を許容できる(より多くの電流を流せる)ようになりました。

また、発熱を下げるためには損失を減らすという手段もあります。実例としては、よりオン抵抗の低いFETに変更する方法などがあります。本キットではTO-220より一回り大きなTO-3P (TO-247) サイズのFETも使用できるので、より低オン抵抗のFETを探すこともできると思います。

例えば、同じIR社製のFETで『IRFP2907』という製品があります。このFETのオン抵抗は4.5mΩ (max) となっており、付属のFETから変更することによりオン抵抗損失を半分以下にすることができます。また、IRFP2907はTO-247サイズと付属FETのTO-220サイズに比べ大型になっており、熱抵抗が小

コラム4-4 電流センサを付けてみよう

本稿で説明したとおり、より速いモータを制御するためには、電流を制御する必要があります。キットには電流センサが付いていないので、ユニバーサル・エリアを使い、取り付けてみたいと思います。

電流をセンシングする手段としては、シャント抵抗などを使うなどいろいろとありますが、ここでは簡単に取り付け可能で追加回路が少なく、損失がほぼない貫通タイプの製品を選択します。例として、タムラ製作所製「L01Z」を使用します。

「L01Z」は電源が5Vの単一電源（マイナス電源不要）で動作し、出力は0.5～4.5Vとなっており、出力電圧の増幅などの必要もなく、そのままマイコンに入力できます。選択できる電流値も50～600Aまでの間で数種類あり、用途によって選択しやすい

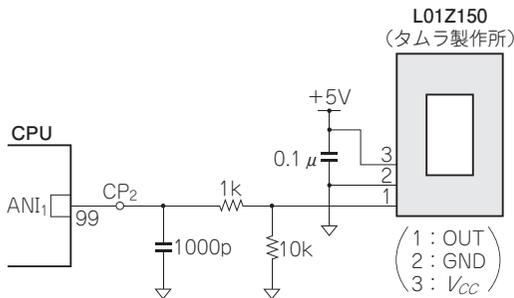


図4-C 電流センサ入力回路

CPUへの入力には簡単なローパス・フィルタを入れている。センサの出力端子は、ある程度大きな抵抗（例では10kΩ）でプルダウンしている。



写真4-C センサの取り付け例

ユニバーサル・エリアを使って、電流センサおよび入力回路を付けている。電流センサは貫通型なので、真ん中の穴にハーネスを通してやれば、そのラインの電流を計測することが可能になる。

と思います。

今回の例としては、±150Aの物を使用しました。この製品の場合、0A時が2.5Vになっており、電流範囲の最大値150Aが4.0V、最小値-150Aが1.0Vの出力電圧になっています。つまり10A変化すると0.1Vの変化です。電流と出力電圧の関係は、製品ごとに違うので、選択した製品の仕様書をよく読んで使ってください。

回路例は図4-Cを参照ください。

キットに添付しているソフトウェアを使うと、空きポートはLow出力設定になっています。第5章のソフトウェアに関する記事を参考にし、アナログ・ポートの入力設定をしてください。また、取り付け状態は写真4-Cを参考にしてください。

電流センサの穴に配線を通すことにより、その電流を測定することができます（向きがあるので注意）。図4-Dは負荷をかけたときの、モータ相電流の波形になります。

このように、簡単な追加回路でモータ電流の情報をマイコンに入力することが可能になります。

電流を測定できるようになれば、電流を制限するなどの制御も可能となり、ベクトル制御など高度な制御も可能になります。ぜひ、チャレンジしてみてください。

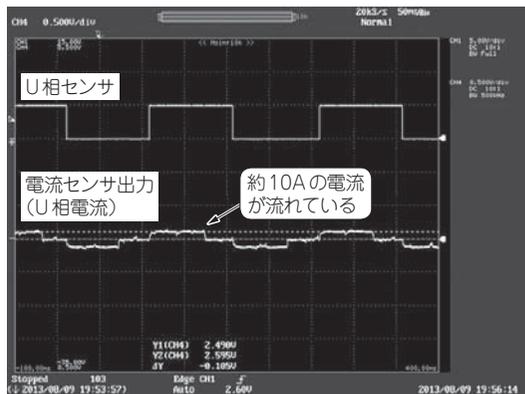


図4-D 電流センサの波形

電気角120°で電流が変化しているのがわかる。2.5V時に0A、そこから上下に0.1V程度変化しているので、約10Aの電流がプラス方向、マイナス方向に各120°区間流れている。

さくなるため、より発熱も小さくなります（走行実験はIRFP2907を使用して行っている）。

以上のことから、なぜ放熱や損失低減が必要か、理

解できたと思います。上記の計算方法は静的な簡易計算方法で、実際はヒートシンクに風が当たると熱抵抗は減りますし、損失も当然計算通りではなく、電流も

リスト5-11 LED点灯/消灯設定 (timer_user.c)

```

interrupt void MD_INTTAB1CC1(void)
{
    /* Start user code. Do not edit comment generated here */
    ...
    P_LED_SENS_U = P_HALLSENS_U; /***< ⊕U相センサLED点灯/消灯 */
    /* End user code. Do not edit comment generated here */
}
    
```

⑭ LED点滅処理

インジケータとしてLEDが九つ準備されています。サンプル・ソフトウェアでは、LED₅～LED₇をホール・センサ、LED₈～LED₁₃をFET通電のタイミングに合わせて点灯/消灯を行い、ホール・センサと転流のタイミングを視覚的に理解しやすくしています(図5-48)。

ホール・センサの割り込みに同期したLEDの点灯/消灯は、ホール・センサ割り込み内で行っています。例えば、U相センサの割り込みのとき、P_HALLSENS_U(ポートP9L3)がHighであればLED D₅にHighを出力(点灯)し、Lowであれば出力を止め(消灯)ます(リスト5-11)。

FETへの通電に同期したLEDの点灯/消灯は、転流パターン設定処理で行っています。転流パターン設定処理では、ホール・センサ・ステージ変換で取得したホール・ステージ・パターンを使って、FET転流パターンを取得していましたが、同じようにホール・ステージ・パターンを使って通電インジケータ点灯パターンを取得します(図5-49)。

5-4 キット・カートに必要な機能の検討

ここまで、サンプル・ソフトウェアのソース・コードを見てきましたが、単にモータを回転させるシステムとキット・カートに搭載して走行するためのシステムとでは、当然ながら必要な機能が違ってきます。例えば、キット・カートでは、常に走行抵抗などモータに負荷がかかることを考えなくてはなりませんし、タイヤに異物が挟まってモータがロックした場合やホール・センサやアクセル、スイッチ類に異常が出た場合に安全に停止させるフェールセーフ機能も必要になります。

しかし、一般走行ではなくレースという観点で考え

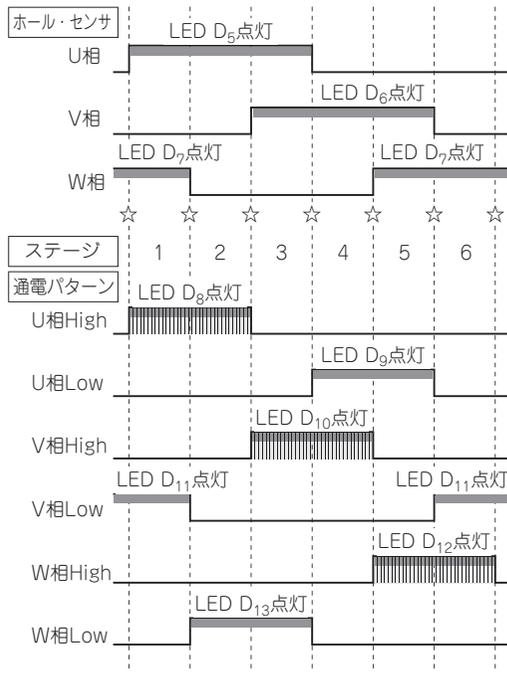


図5-48 LEDと通電パターン
図5-42のタイムチャートにLEDの点灯/消灯のタイミングをかぶせている。

ると、安全に停止させるのではなく、多少のリスクを負っても走行を続けたい場合もできます。また、レースといっても、スプリント・レースであれば、FETが耐えるギリギリまでモータ電流を流すために、モータ電流を監視する電流センサが必要かもしれませんし、長時間の省エネ・レースであれば、LEDの消費電力さえ節約したいかもしれません(図5-50)。

このように、キット・カートが使われるシチュエーションによって、必要な機能を設計していくことが重要となります。

ここでは、モータ電流やバッテリー電圧などハードウェアの変更を伴う機能ではなく、キット・カートを使った省エネ・レースを前提に、出力Dutyの漸近処理とモータの回転数の算出の二つの機能を追加したいと思います。

● 出力Dutyの漸近処理

サンプル・ソフトウェアでは、アクセルの入力から

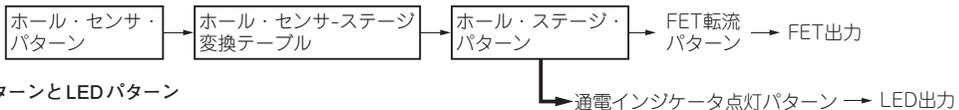


図5-49
ホール・センサICパターンとLEDパターン
ホール・センサICのパターンをステージに変換したように、LEDの点灯パターンに変換する。

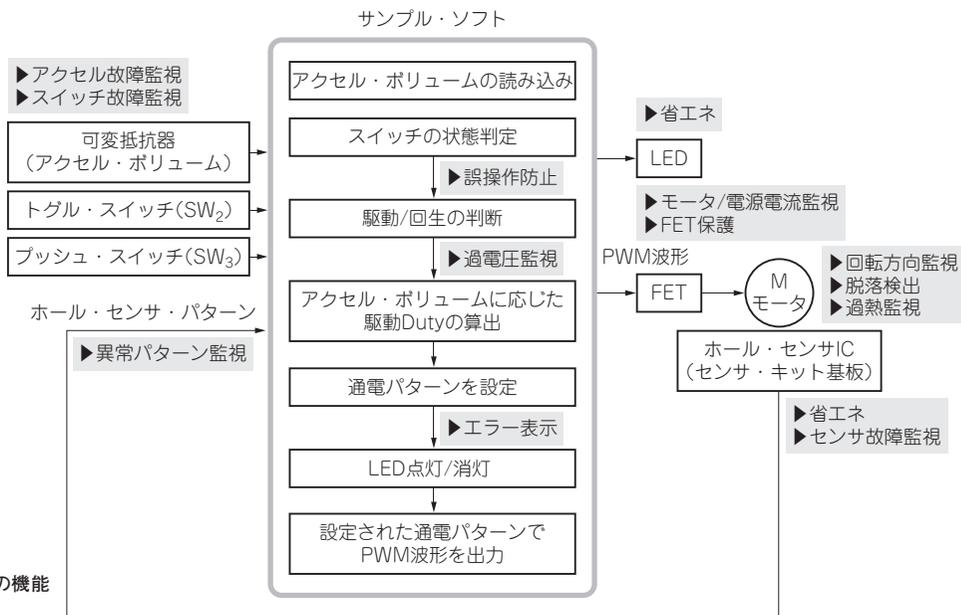


図5-50
カートに必要な数々の機能
(グレーの部分)



図5-51 アクセル操作とモータ出力
ユーザのアクセル操作がリニアにモータ出力へと伝達していく。

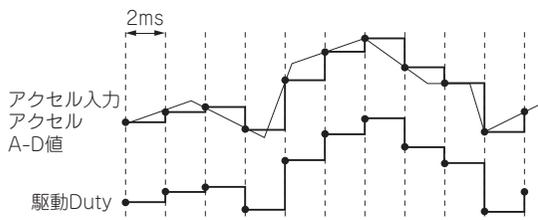


図5-52 アクセル操作と駆動Duty
アクセルA-D値の読み込みと駆動Dutyの算出タイミングは同じなので、アクセル操作に敏感に反応した駆動Duty出力となる。

Dutyの出力まで、図5-51のようになっています。2msごとにアクセル入力のA-D値を読み取り、駆動Dutyに変換して出力されます。この場合、ユーザからの入力に対するレスポンスはよいのですが、裏を返せば、ちょっとした操作にも過敏に反応してしまいます(図5-52)。車両の急加速は、過電流の原因にもなりますし、電費(自動車という燃費)にもよくありません。

そこで、図5-53のようにアクセル入力に対してゆっくりとした制御周期で目標Dutyを決定し、それに徐々に追従する形で駆動Dutyを変化させるように処

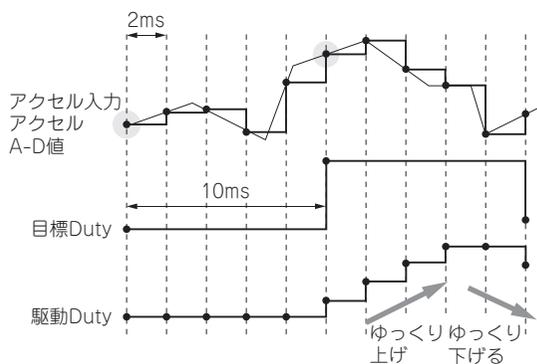


図5-53 目標Dutyの設置
アクセルA-D値の読み込みと駆動Dutyの間に目標Dutyを設置する。目標Dutyの算出はアクセルA-D値の読み込みタイミングより遅くし、それに駆動Dutyを追従させることで、アクセル入力からモータ出力までを鈍らせることができる。

理を変更します。

コードにしてみます。まず、⑨駆動Duty算出処理を差し替えて、⑮目標Duty算出処理を新たに作成します(リスト5-12)。アクセル開度に応じてdutyを算出しているのは、⑨駆動Duty算出処理と同様の方法ですが、駆動Dutyそのものではなく、目標Dutyを保存するために新たに追加したwuTargetDuty変数に算出したDutyを入れています。また、目標Duty算出処理は2msごとに呼び出されるので、内部で5回カウントして10msごとに上記処理がなされるようにしています。今回、関数の中で10msの制御周期を作

見本

このPDFは、CQ出版社発売の「トラ技エレクトロニクス No.3」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/MTR/MTRZ201310.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

