

# マイコンによる電気自動車用モータ駆動システム

Microcomputer controlled motor drive system for an electric vehicle

恩田 一\*  
Hajime ONDA

**Abstract:** A motor drive system for an electric vehicle is described. The drive system is controlled by a microcomputer with PWM mode. An Insulated Gate Bipolar Transistor. (IGBT) chopper is used to drive a DC motor with a battery. A very fast switching of the IGBT is necessary to improve the switching performance in accordance with least switching power losses. Several methods are proposed and experimented to achieve this improvement. A soft switching technique seems to be most useful for this purpose but which is not achieved.

## 1. はじめに

環境問題がクローズアップされる中, 早晚自動車は電気自動車への移行が必然と見られている. 本学電気電子情報工学科では環境にやさしく電気・電子技術満載の電気自動車を学科のシンボルとし, 対外的 PR 用に高校生の興味を引きそうなスポーツタイプの電気自動車を購入した. その名称を本学のシンボル「お理工ちゃん」からとって「お理工カー」とした. このモデル車に, 各教員の専門分野からテーマ選定した研究項目技術を付加してさらにインテリジェント化し, その名のとおり「お理工 (インテリジェント) カー」を完成させるプロジェクトを立ち上げ, 活動中である. 本報告は, そのプロジェクト活動の一環である.

電気自動車の中核はなんと言っても主動力源のモータとエネルギー源のバッテリーである. 本報告は電気自動車の動力源であるモータの駆動制御システムに関するもので, モデル車搭載のモータ駆動システムを, より高性能化することを目的としている.

## 2. システムの構成

### 2.1 モデル車の動力部構成

図1に購入したモデル車の写真を示す. 法的には「小形特殊車」に属する車で, 車両ナンバーも取得し, 市中のデモ走行も行っている. オープンキャンパス等の学内イベントには必ず出現するようにしている. 常時は事務棟ロビーに説明用の立て看板と共に展示している. 写真中の矢印は関連する技術の研究テーマで, 学科のプロジェクト員が自身の研究や卒研テーマとして推進中のものである. これらは7テーマあり, その内2テーマはほぼ完了である. 本報告のテーマも, これらの内の1テーマであるが, まだ研究途中のテーマで, 本報告は中間報告である.

モデル車の駆動部構成を図2に示す. モータは旧式になるがブラシ付きの直流直巻モータで, パワーMOSFET トラ

ンジスタで構成されるチョッパによって, 車載された 72 V バッテリーから駆動される. 図3に, モータとドライバーの写真を示す. ドライバーは密閉構造で, 外箱が風冷用の放熱板を兼ねている. モータ, ドライバー共に空冷で, 制御ボックスに設置されてブローで冷却されている.



図1 モデル電気自動車

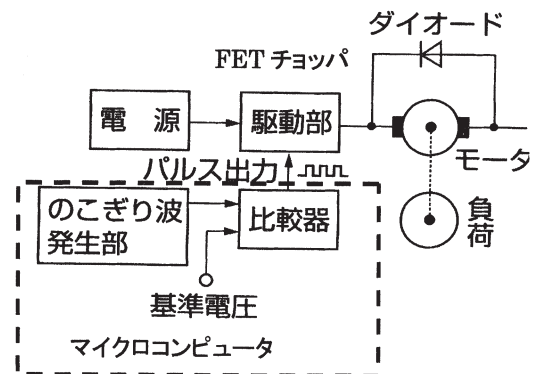


図2 モータ駆動部の構成

2008年3月4日受理

\* 理工学部 電気電子情報工学科

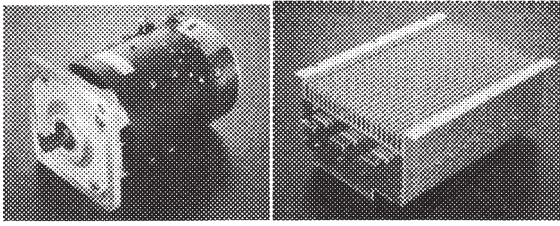


図3 モータとドライバー

2.2 システムの全体構成

本研究実験システムの全体構成を図4, 装置全体写真を図5に示す. 主な構成はマイコン部とチョップ部である.

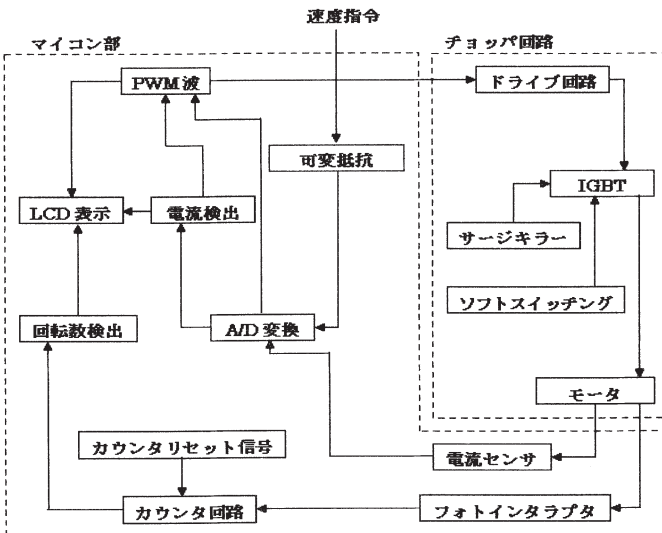


図4 システム全体構成

マイコン部の動作は下記である. その大まかなフローチャートを図6に示す.

- ①可変抵抗器から供給されるアナログ電圧をデジタル化し, これに応じてチョップの出力電圧を制御するためにパルス幅変調 (PWM) された信号を作り出す.
- ②モータ電流を非接触電流センサで検出し, A/D変換する. この電流値を監視し, 過大な電流が流れた時, チョップを停止して, 安全確保とチョップ回路保護を行う.
- ③モータの回転数を回転軸に取り付けたパルス発生器のパルス数から検出して, 液晶表示器に表示する.

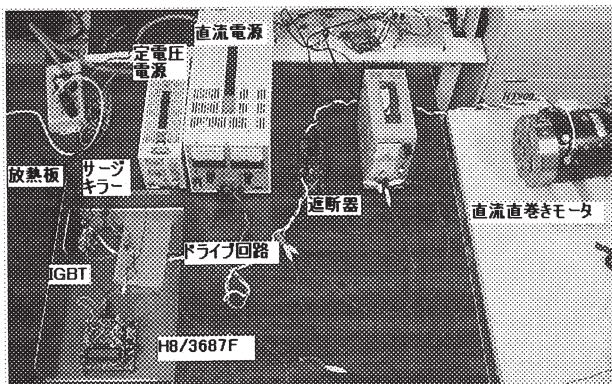


図5 装置全体写真

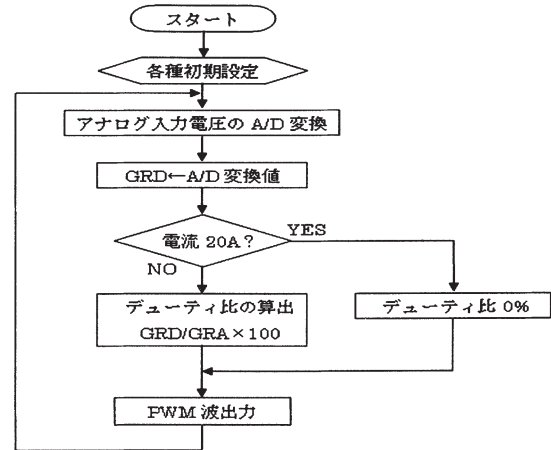


図6 マイコン制御フローチャート

一方, チョップ部の動作は下記である.

- ①マイコン部からPWM信号を入力され, この信号に応じたデューティでスイッチング素子のIGBTをON/OFFする.
  - ②スイッチング素子での損失を減らすために, ベース駆動回路, サージキラーを十分機能させる.
- チョップ部動作については別途詳しく述べる.

3. マイコンによるPWM信号の発生

PWM制御は, パワーエレクトロニクスにおける基本的な技術で, 電力制御用半導体素子の電力損失を減少させるための方法である. 半導体素子をスイッチとして扱い, そのON/OFFの比(デューティ)を変えることにより出力電圧を制御するものである. 多くの制御用マイコンはPWM信号を効率的に発生する機能を有している. 基本的にはタイマとカウンタの応用で, 図7に示すような動作を行う. 即ち, 内部クロック信号をカウンタでカウントし, レジスタGRAに設定された値になるとリセットされ, 図示の鋸歯状波を発生する. これがスイッチング周波数を決定する. パルス幅を決定する他のレジスタ, たとえばGRBに所定の値を設定すると, 図7上部FTIOBのようなパルス波形が得られる. また, レジスタの設定値をGRCのようにすると, 図7下部FTIOCのようなパルス波形が得られる. このようにして, レジスタに設定された値によって, パルス幅をゼロから最大まで変化させることができる.

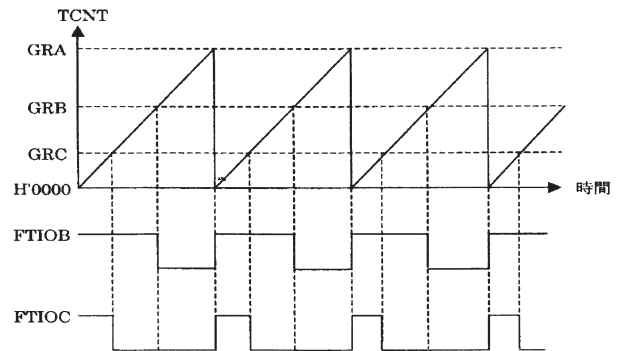


図7 マイコンでのPWM信号発生原理



4. IGBT チョップ

4.1 IGBT 素子

電気自動車用のような大電力を制御する半導体素子としては表1に示すようなものがある. これらの中で本研究に適した素子として IGBT を選定した. その主な理由は下記である.

- ①使用電圧 (100V前後), 電流 (数十A程度) 条件
- ②スイッチング周波数 (20 kHz 前後) 条件
- ③ゲートドライブは電圧駆動で, 少ない電流で済む.
- ④モジュール化されて使い易い.

表1 各種電力用素子の性能

素子種類	最大電圧 (V)	最大電流 (A)	最大周波数 (kHz)	ゲートドライブの難易
サイリスタ	6000	2500	1	△
バイポーラ Tr	1200	800	10	×
パワーMOSFET	1000	30	100	◎
IGBT	1200	300	50	○

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) はパワーMOSFET とバイポーラトランジスタの長所を取り入れた電力用半導体素子である. 入力(ゲート駆動)はパワーMOSFETの絶縁ゲート形で電圧駆動タイプのため入力電流が少なく済む. 一方, 出力段はバイポーラトランジスタで, オン時の飽和電圧が小さいため, 電力損失が少ない. 使用した IGBT 素子の回路図と外観写真を図8に示す. 大電力用素子は回路図に示すように並列接続の帰還ダイオードと共に内部接続されてモジュール化されており, 配線や冷却器への取り付けが大変し易い形で供給されている. ここでは2素子入りのモジュールを使用し, 1つの IGBT トランジスタともう一つの素子のダイオードのみを帰還ダイオードとして利用している.

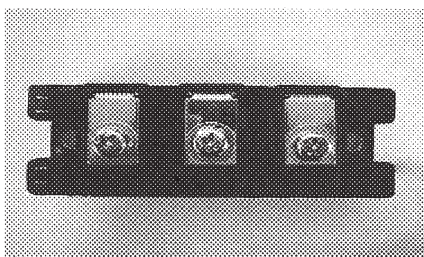
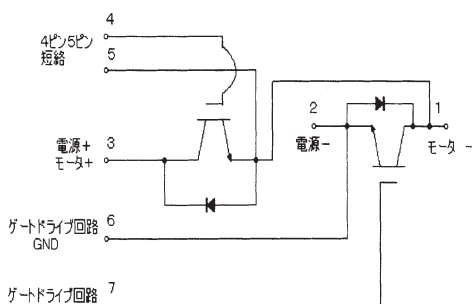


図8 IGBT モジュール

4.2 IGBT チョップの構成とスイッチング動作

IGBT チョップの主回路部分を図9に示す. 前述したように, IGBT 1素子と, 直列接続されたもう1素子のダイオード部分のみをモータに並列接続して, フライホイールダイオード  $D_{F2}$  としている. スwitchingのオフ時に IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧  $V_{ce}$  が過大になって破壊するのを防ぐため, コレクタ・エミッタ間にサージキラーを接続してある. モータに直列に接続してるリアクトル  $L$  はソフトスイッチング用の素子である.

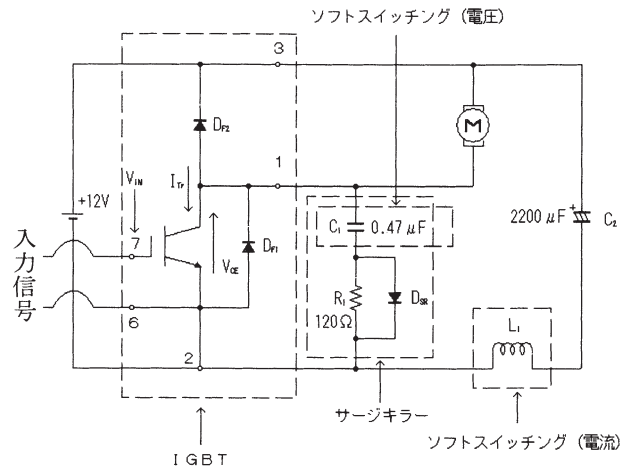


図9 IGBT チョップ主回路

IGBT チョップの動作を図10により説明する. ゲート電圧のオン/オフにより IGBT のスイッチングが行われる. オフ時 ( $T_{off}$ ) にはトランジスタの電流  $I_{tr}$  はゼロになり, コレクタ・エミッタ間電圧  $V_{ce}$  は電源電圧  $E$  まで上がる. オン時 ( $T_{on}$ ) には電流  $I_{tr}$  は急激に立ち上がり, コレクタ・エミッタ間電圧  $V_{ce}$  は急激に下がる. しかし, オン時にも  $V_{ce}$  は完全にはゼロにならず, いくらかの電圧が残る. この時,  $V_{ce}$  と  $I_{tr}$  の積が IGBT 素子内の損失になる. これをオン時損失と言う. オフ時には, それまで IGBT に流れていた電流はフライホイールダイオード側に転流して, モータとの間で循環する.

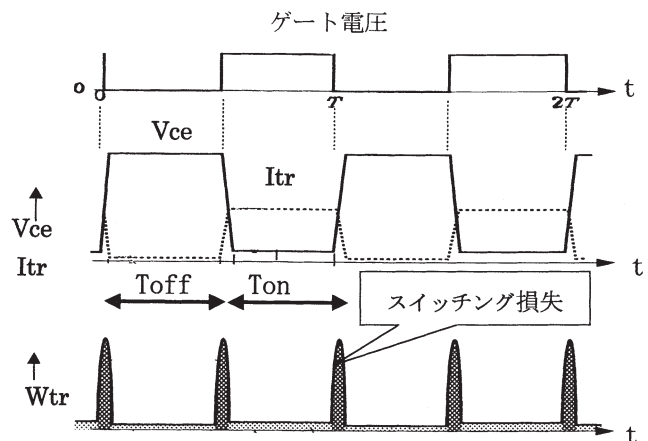


図10 IGBT の動作波形

オフ時にも素子の損失は存在するが、これは非常に小さい。オン時、オフ時の損失を合わせて定常損失と呼ぶ。

スイッチングのオン/オフ時にはスイッチング素子の電流・電圧は瞬時に切り替わるわけではなく、図10の $V_{ce}$ と $I_{tr}$ のようにお互いが重なり合って変化する。この時、 $V_{ce}$ と $I_{tr}$ の積はIGBT素子内の損失になる。これをスイッチング損失とよぶ。IGBTの素子内損失を $W_{tr}$ とした時、 $W_{tr}$ は定常損失とスイッチング損失の和で図10の最下部に示すような波形になる。スイッチング損失は短時間ながら、そのピーク値はかなり大きくなる。もともと、電力用半導体素子をスイッチング方式で使用するのには、素子内での損失を無くすための方法であるが、スイッチング周波数が高くなるとスイッチング損失の割合が大きくなり、無視できなくなる。

本研究では、これらIGBT素子内で発生する損失を最低限に抑えて、小形で効率の良いIGBTチョップを構築するのが大きな課題である。

#### 4.3 素子内損失の低減方法

素子内損失を低減する方法としては下記が考えられる。

- ①スイッチングを完全に行わせるために、IGBTのゲートドライブを十分(高速、完全)に行う。
- ②スイッチング時の $V_{ce}$ 、 $I_{tr}$ の立ち上がりを制御する。

①は電力用素子を使用する場合の基本的な項目である。素子を完全にオンさせるためには十分大きな電圧・電流を高速にゲートに供給する。これにより、高速なスイッチングと、IGBTを完全に飽和領域にすることにより、オン時の $V_{ce}$ を最低限にすることができ、損失を低減できる。特に、IGBTはゲートが絶縁型であるため容量(コンデンサ)分が大きく(2500pF)、この容量を高速に充電するために高速な電流供給が必要である。本研究ではトランジスタ2段によるゲート駆動を行った。ゲート駆動回路を図11に示す。

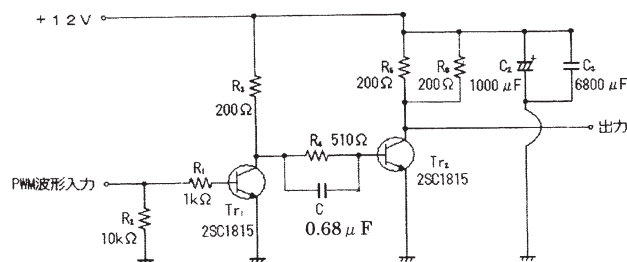


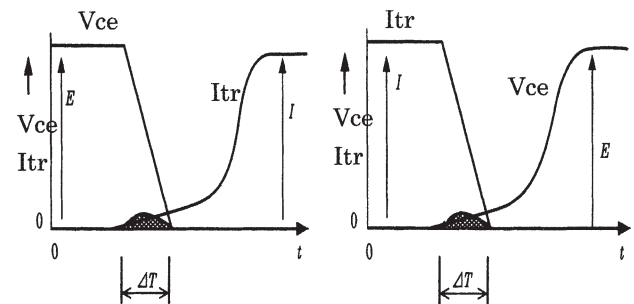
図11 ゲートドライブ回路

②は、まずスイッチング時間をできる限り短くすることが第1である。図10において、スイッチング周期 $T$ ( $T_{off} + T_{on}$ )に比べてスイッチング時間が十分短ければスイッチング損失の発生頻度が低く、スイッチング損失は少ない。

しかし、最近ではスイッチングにともなう騒音を人間の可聴周波数範囲以上に選ぶことが多い。本研究でもスイッチング周波数は、マイコンのクロック周波数との関係で17.7kHzに設定している。この場合、スイッチング周期 $T$ は56.4 $\mu$ sである。スイッチング時間は①のゲートドライブの性能とも関係するが、速くても数 $\mu$ sあるので、オンとオフの両方でスイッチング時間の割合が周期の10%程度になり、全損失の中で支配的になる。従って、この損失は積極的に低減する必要がある。スイッチング損失を低減する方法として「ソフトスイッチング」法がある。

#### 4.4 ソフトスイッチング

スイッチング損失を低減するには、図10でスイッチング時の $V_{ce}$ と $I_{tr}$ の重なりを無くせばよいことになる。すなわち、IGBTのオン時には電流 $I_{tr}$ の立ち上がりを抑え、オフ時には電圧 $V_{ce}$ の立ち上がりを抑えることにより、重なりを減少させることができる。前者をゼロ電流スイッチング、後者をゼロ電圧スイッチングと呼び、両者をまとめてソフトスイッチングと呼ぶ。これに対して図10のような方法をハードスイッチングと呼ぶ。ソフトスイッチング時の電流・電圧波形を図12に示す。



(a)ゼロ電流スイッチング (b)ゼロ電圧スイッチング

図12 ソフトスイッチング

##### ①ゼロ電流スイッチング

IGBTのオン時には、図12(a)で示すように、電圧 $V_{ce}$ が急激に減少し、電流 $I_{tr}$ が増大する。この時、図8のLで示すリアクトルをIGBTと負荷に直列に挿入しておくと電流 $I_{tr}$ の立ち上がりを抑制できる。それにより、電圧と電流の重なり期間 $\Delta T$ を小さくでき、結果としてスイッチング損失 $W_{tr}$ を減少させることができる。

##### ②ゼロ電圧スイッチング

IGBTのオフ時には、図12(b)で示すように、IGBT電流が急激に減少し、電圧が増大する。この時、図9のサージキラー破線内で示すように、IGBTと並列にコンデンサを接続しておくことで電圧の急激な上昇を抑えることができる。このコンデンサの役割は、元々は電圧の急激な上昇による素子の破壊防止のためであるが、ソフトスイッチングとしての機能を持たせることができる。IGBTのオン時とオフ時の特性から、図9に示すような直列抵抗と並列ダイオードとの複合回路が良く用いられる。

5. 実験結果

5.1 IGBT チョップ動作

IGBT チョップの動作波形を図 13, 14, 16, 17 に示す. パラメータとして表 2 の条件 1 ~ 4 に示すように変更した. 条件 3, 4 はソフトスイッチングに対応するものである.

表 2 実験条件のパラメータ

条件	各低減策	抵抗(Ω)	コンデンサ(μF)	コイル(μH)
1	サージキラー(ダイオード無し)	120	0.94	-
2	サージキラー(ダイオード付き)	120	0.94	-
3	ゼロ電流スイッチング	120	1.41	1.9
4	ゼロ電圧スイッチング	120	3.76	-

オシロスコープの波形はそれぞれ上から, ①IGBT ゲート入力, ②IGBT のコレクタ・エミッタ間電圧  $V_{ce}$ , ③IGBT 電流波形  $I_{tr}$  とフライホイールダイオード波形  $I_d$  およびモータ電流  $I_m (= I_{tr} + I_d)$ , ④IGBT の素子損失  $W_{tr} (= V_{ce} \times I_{tr})$  である.

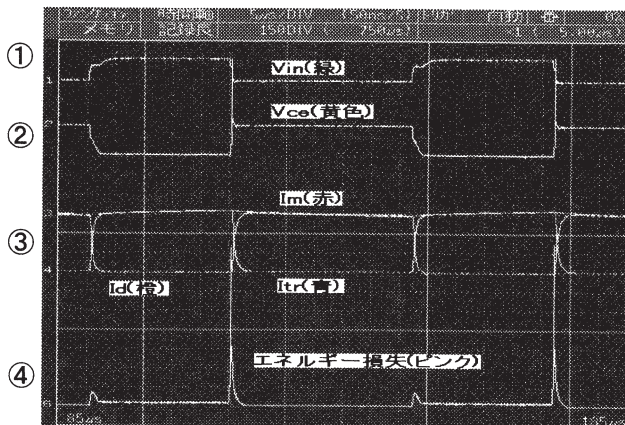


図 13 チョップ動作波形 (条件 1)

図 13 の条件 1 は, 表 2 で示すように, 通常のサージキラー付き回路で, ゲートドライブを完全に実現できているために, IGBT のオン/オフが完全に行われていることが確認できる. すなわち, ゲート信号が H レベルの時はオン時で,  $V_{ce}$  がゼロに近く (0.6V)  $I_{tr}$  は高速に最大値まで到達している. ゲート信号が L レベルの時はオフ時で,  $V_{ce}$  がゼロから急激に立ち上がってヒゲ状のサージが発生するが, 素早く電源電圧まで上昇して完全にオフ状態となり, 電流  $I_{tr}$  はゼロになる.

性能の評価項目としては①オフ時の  $V_{ce}$  の電圧上昇最大値, ②素子損失  $W_{tr}$  の最大値 (W), ③素子損失エネルギー (Wtr の時間積分値;  $W \cdot s$ ) である. 図 13 の場合①は 52.2 (V), ②は 840 (W), ③は 0.289 ( $W \cdot s$ ) であった.

図 14 は条件 2 の場合で, サージキラーの抵抗に並列に高速ダイオードを接続したものである. IGBT のオフ時に  $V_{ce}$  に乗るヒゲ状のサージをダイオードとコンデンサを通して高速に吸収すると言うメカニズムである. オシロスコープの図形 2 段目の  $V_{ce}$  立ち上がりを図 13 の場合と比べてみると大分減少しているのが見て取れる. オシロスコープ上で読み取ると 30V で, 図 13 の場合の 6 割程度に減少しており, これにともなって, IGBT 素子損失  $W_{tr}$  も 0.46 (W) に減少している.

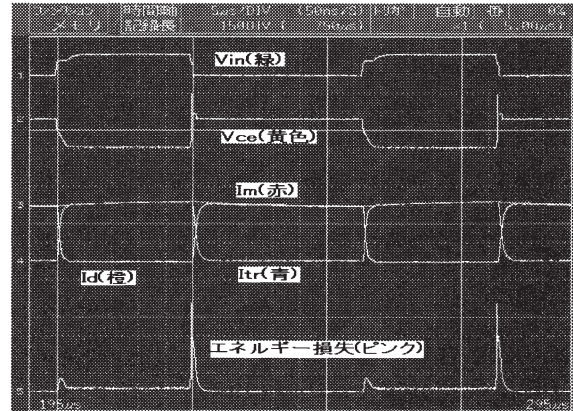


図 14 チョップ動作波形 (条件 2)

図 15 に, 各条件における評価結果をまとめてある. 条件 2 では素子損失エネルギーも条件 1 の場合の半分近くになっており, サージキラーのダイオードは大変有効であることが解かる.

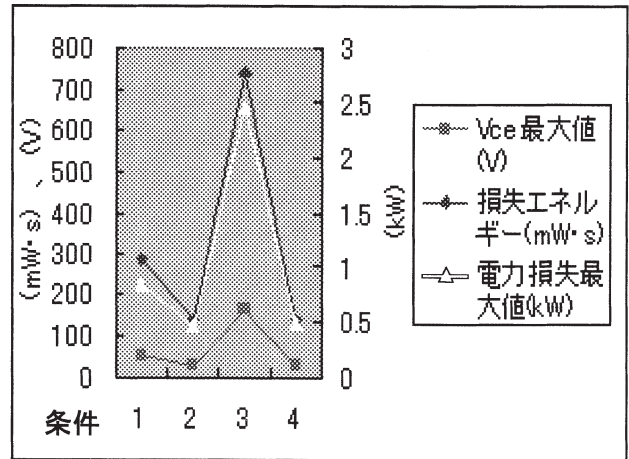


図 15 各条件下での評価結果

図 16, 17 は表 2 の条件 3, 4 に対応するソフトスイッチングに関する実験結果である. 図 16 はゼロ電流スイッチングを実験したもので, 図 9 で示したようにリアクトル L (1.9 μH) を入れたものである. オン時の電流立ち上がりは抑制でき, オン時の素子損失がゼロ近くまで抑制できたが, オフ時の  $V_{ce}$  が回路の共振により大きく振動しており, ここでの素子損失が非常に大きくなってしまった.



回路内の浮遊容量や浮遊インダクタンスを含めて詳細な検討をした上で、リアクトルの大きさLを決定する必要がある。

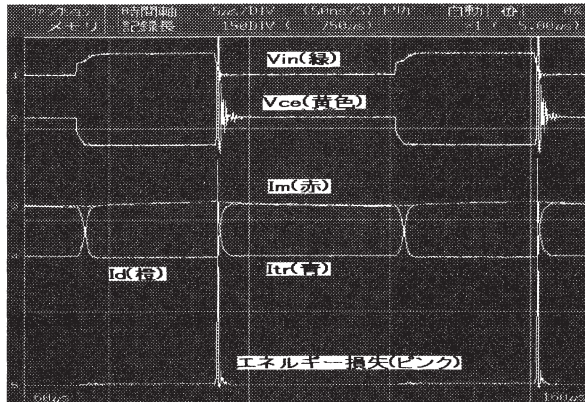


図16 チョップ動作波形 (条件3)

図17はゼロ電圧スイッチングの場合である。IGBTのオフ時にVceの立ち上がりを送らせてスイッチング損失減少を狙ったものであるが、効果はほとんど見受けられない。表2で示した並列コンデンサ容量がまだ少なく、Vceの立ち上がりが抑制されていない。10 $\mu$ F程度が必要かと思われる。

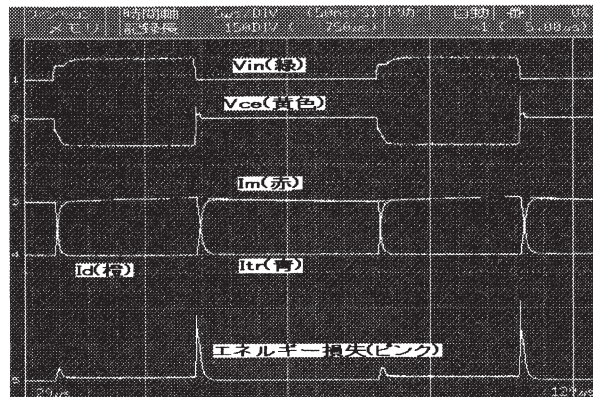


図17 チョップ動作波形 (条件4)

## 5.2 モータ制御特性

マイコンからの入力により IGBT チョップを用いてモータを駆動し、オープンループで回転数制御した。また、モータの回転数を測定しマイコン付属の液晶表示に表示した。モータ印加電圧と回転数の関係を図18に示す。回転数はモータ軸につけたセンサからパルスで検出した測定値と、市販のデジタル回転計で測定したものを両方に表示した。

モータはマイコンに制御されてスムーズに回転し、所定の1800 (rpm)まで直線的に制御できていることが確認された。回転し始める電圧がゼロボルトではなく、3V程度であるのは始動トルクが大きく、かなりの始動電流を必要とするからである。また、マイコン内で測定した回転数も誤差無く正確に回転数を検出できていることがわかる。

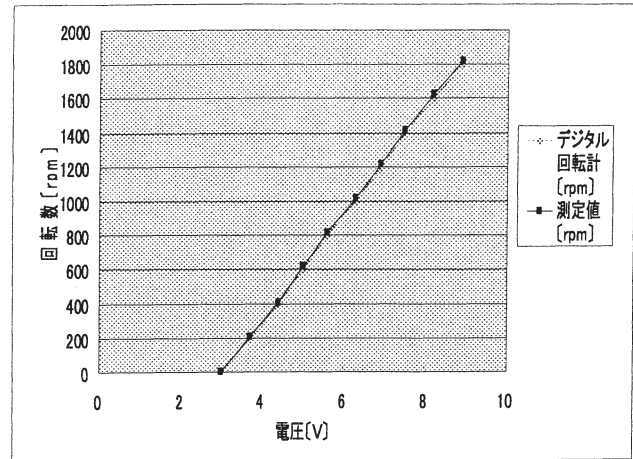


図18 モータの電圧—回転数特性

## 6. まとめ

### 6.1 結果のまとめ

制御用マイコンを用いて大容量 IGBT チョップによる DC モータ駆動の基本的な技術を確立することができた。スイッチング損失を低減するため種々の方法を検討し、概略の傾向を把握することができた。

### 6.2 今後の課題

さらなる高性能化のために、下記を検討する必要がある。

#### (1) スwitching損失の低減

ベースドライブをさらに高速化してスイッチング時間を短縮化し、今回は不十分だったソフトスイッチングを完成させること。そのためには、多数のコイルやコンデンサを用意して実験的に確認するのは非効率であるので、シミュレーションによる検討を導入する。

#### (2) 電流制御系の構築

電流制御系の導入により、より高速なトルク制御が可能になり、過電流対策もより容易になる。

#### (3) 耐ノイズ対策

回転数検出カウンタの誤動作等が発生しており、ノイズを出す側と受ける側両方からの対策が必要。

本研究は2007年度卒業研究として実施したものである。担当した卒研生の佐野祐康君、寺田敬仁君、山下圭介君、山下洋輝君の努力に感謝致します。

## 参考文献

- 堀 桂太郎；“H8 マイコン入門”，東京電機大学出版局 (2003年)
- 岡昭雄；“パワーエレクトロニクス入門”，森北出版 (1997年)
- トランジスタ技術 Special No.85 改訂\*実践パワーエレクトロニクス入門，CQ出版 (2004年)
- 島田義人；H8/Tiny マイコン完璧マニュアル，CQ出版 (2005年)