

# HV・EV用ブラシレスDCモータの教育用教材の試作\*

協田 喜之<sup>1)</sup>

市野瀬 和正<sup>2)</sup>

坂井 淳<sup>3)</sup>

## An Experiment on Teaching Material of Brush-Less DC Motor using HV and EV

Yoshiyuki Wakita

Kazumasa Ichinose

Jun Sakai

In this paper, we propose the 4-step teaching processes and 4 teaching materials on the education of a Brush-Less DC Motor. Assume that students well know a Brush Motor, such as starter. (Step 1) Revolving field is explained, because it is great difference between Brush Motor and Brush-Less one. (Step 2) The magnets are replaced with the coils. (Step 3) Revolving field using brush is shown. (Step 4) The brushes are replaced with the read switches. Additionally, in the step 3 and 4, worksheets for understanding of the motor operation are illustrated.

Key Words: Teaching Material, Brush-Less DC Motor, Hybrid Vehicle, Electric Vehicle

### 1. はじめに

ハイブリッドカー（以下HVと略す）は、1997年3月より量産され、近年に至っては販売台数の首位を占めるほどの普及に至っている。また、電気自動車（以下EVと略す）は、昨年より量産が開始され、新自動車革命と称されて大変な注目を集めている。これらHVとEVに共通なキーテクノロジーは、もちろん「電動技術」である。

電動技術のうち、HV・EVの普及に最も貢献した構成部品は、紛れもなくバッテリーである。このほかにもブラシレスDCモータ、インバータ、大電力スイッチングトランジスタ、マイクロプロセッサ、電子制御技術など、地味でありながら無視できない構成部品は数多い。よって、HV・EV時代の自動車整備士として学ぶべき内容は多岐に渡る。ところが、これらの構成部品を可動か否かで分類すると、ブラシレスDCモータがほぼ唯一の可動部品であると言える。ブラシレスDCモータ（およびジェネレータ）は、部品の重要度から言っても、また消耗部品であることから言っても、自動車整備士が真っ先に学習すべき構成部品の一つであると言える。

本稿では、ブラシレスDCモータを理解するにあたり、最も理解が困難と考えられる、3相スター結線のコイルが発生する回転磁界の動きと、その回転磁界を形作る3相全波モータ駆動回路の働きについて、理解を助ける教育用教材および指導テキストを開発することを目的としている。なお、教育の前提として、学生はブラシ付きDCモータ（スタータ等のモ

ータ）について、その原理および構造は理解していることとし、この知識を発展的、段階的に学習していくものとする。

### 2. ブラシレスDCモータの概要

近年、ブラシレスDCモータは、小さいものはコンピュータの光学ドライブやハードディスクのスピンドルモータ、身近なものには冷蔵庫やエアコンのコンプレッサモータなど、多分野に渡り、様々な仕様のモータが利用されている。

本稿ではHV・EV用ブラシレスDCモータを取り扱うため、実車のモータ仕様と大きく差異の無いものとした。同時に、教育効果を配慮した抽象化も必要である。そこで、本稿におけるブラシレスDCモータの回路図をFig.1に、3相スター・コイルの実体配線図をFig.2の通りに定める。

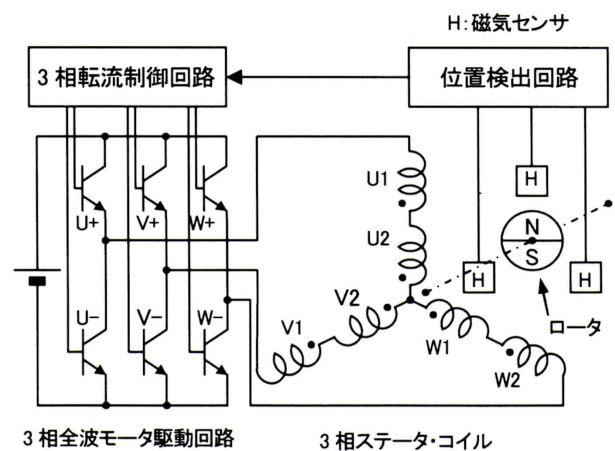


Fig.1 ブラシレスDCモータ回路

\*平成22年 月 日受理.

\*第42回全国自動車短期大学協会研究発表会において発表.

1)・2)・3) 新潟工業短期大学 自動車工業科

(950-2076 新潟県新潟市西区上新栄町5-13-7)

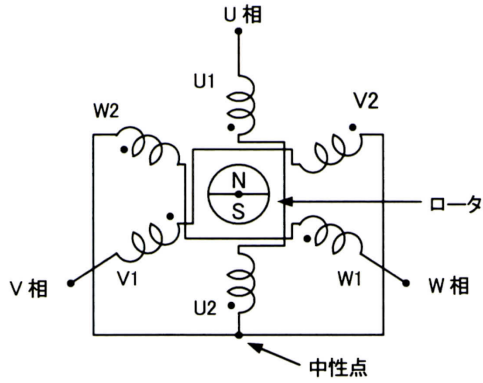


Fig.2 ステータコイルの実体配線図

また、Fig.1 と Fig.2 に示したブラシレス DC モータの基本構造の仕様を Table 1 の通りに定める。

Table 1 ブラシレス DC モータの仕様

項目	本稿での仕様
①基本構造	3相インナ・ロータ式
②マグネット・ロータの磁極数	2極 (N・S 各1極)
③ステータ・コイルの結線方式	3相スター結線
④ステータ・コイルの磁極数	6極 (対向する極を同一コイル配線とするため)
⑤ステータコイルの巻線方式	集中巻 (配線の理解が容易)
⑥モータ駆動回路	3相全波モータ駆動回路

教育上の関心事項として、Table 1 の仕様と、実車用モータとの相違点について検討を行っておく。大きな相違点はおおよそ②、④、⑤の3項目のみであると言える。

このうち⑤のステータコイルの巻線方式は最も重要な相違点である。巻線方式は、大別すると集中巻と分布巻の2種類がある。一般的に、出力特性や低速回転時の回転ムラを低減したい場合には分布巻を採用し、同一径で軽量化や電力効率を優先する場合は集中巻を採用する傾向にある。現在のHV・EVにおいては、両方式とも採用実績がある。なお、参考として、集中巻と分布巻の特徴比較を Table 2 に示す。

また、②、④の磁極数は、性能を決定する項目である。分布巻の場合は磁極数とスロット数を増やすと出力特性や回転ムラは良好となるが、配線が複雑となり駆動に寄与しない巻線部 (コイルエンド) が増大し、重量と抵抗損が悪化する。集中巻においては、コアを磁極数で分割するため、コアの強度、巻線占有率、製造コストとのトレードオフとなる。実際の例として、集中巻のステータ・コイルは18極~24極分布巻のステータ・コイルでは24スロット (24極単層巻, 12極2層巻のいずれであるかは不明) の採用例がある。

Table 2 集中巻方式と分布巻方式の比較

項目	集中巻	分布巻
出力特性 ※	●起磁力が方形波となり高調波損失を生じる	○極数増で起磁力が正弦波となり良好
低速時回転ムラ (コギング) ※	●大きい	○極数を増やすほど低減
巻線占積率	●磁極形状により不利. 巻線方法の工夫で改良	○スロット形状により良好
コイルエンドの体積	○少ない	●極数を増やすほど増加する
軽量化 ※	○小型化が容易	●極数を増やすと不利
コイルエンド分の抵抗損失 ※	○少ない	●極数を増やすほど増加する
コアの製造	●分割コアの加工精度が必要	○一体コアのため製造が容易
巻線工程	○容易	●極数を増やすほど複雑となる

※ 特に車両性能に大きく関わると考えられる項目

### 3. 教育内容および指導方法について

本章では、教育の前提条件であるブラシ付き DC モータの知識からスタートし、ブラシレス DC モータの動作を理解するまでの、教育内容の流れについて検討する。また、その教育内容を指導するための方法についても検討する。

ブラシ付き DC モータの知識から、ブラシレス DC モータの知識への補間は、次のようなシナリオで行なう。

#### 3.1. 回転磁界によるロータの駆動

まず回転台の上の、回転軸を挟む対向位置に永久磁石を配置する。次に固定台の回転軸上に方位磁石を配置する。そして回転台をノブで回すと、磁界の回転にあわせて方位磁石の磁針が回転する。教材の概略図を Fig.3 に示す。

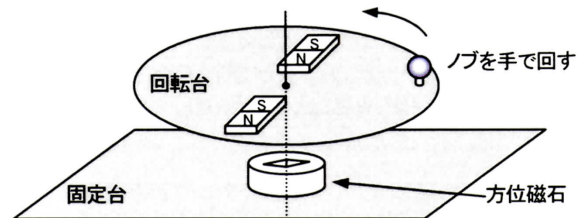


Fig.3 回転磁界によるロータ駆動の教材

通常、ブラシ付き DC モータでは磁界をステータとし、ロータに電流を流すフレミングの左手の法則が基礎となっているが、この教材では、磁界を回転させ、磁石の吸引力をトルクとする発想の転換を与えることを目的としている。

また、方位磁石をマグネット・ロータに置き換え、簡易的にトルクを測定する治具を追加することで、回転磁界式モータのトルク性能の基礎について考察することも可能となる。

### 3.2. 永久磁石からコイルへの置き換え

回転台の上の永久磁石を、固定台上のコイル（電磁石）に置き換える。すなわち、永久磁石を回転させる代わりに、コイルに接続するバッテリーの極性で回転磁界を発生させることを学ぶ。教材の概略図を Fig.4 に示す。

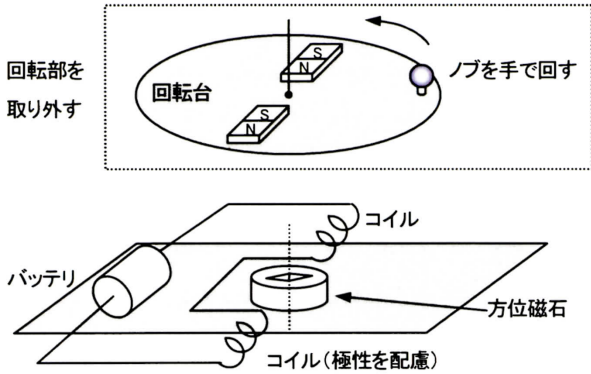


Fig.4 永久磁石からコイルへ置き換えた教材

ブラシの配置は複雑となるので、まずは、手でバッテリーを繋ぎ変えることから始める。2 個 1 対のコイルでは、回転方向が確定しないことを理解したら、コイル 2 対、3 対に増やしていく。

3 対のコイルを配置して回転磁界を発生させた段階で、コイルを個別で動作させる方法から、コイルを Fig.2 のスター結線に接続する方法に発展させる。スター結線により、スムーズな磁界の切り替えが可能となることを学ぶ。

### 3.3. ブラシを使った回転磁界の発生

前段階で、コイルとバッテリーの接続を手で行なう煩雑さから、ブラシを使った回転磁界の発生に発展させる。教材の概略図を Fig.5 に示す。

この段階になると、教材は、コイル台とブラシ&コンミュテータ台の 2 セットに分かれる。コイルとブラシは Fig.2 の通りに結線する。ブラシは固定台側に設置し、コンミュテータとバッテリーがセットとなった回転台を回転させることになる。コンミュテータの形状は、三相波形を発生させる役割を担っており、Fig.6 のような構造になっている。3 本のうち 2 本のコイルが順にバッテリーにつながるように、+極コンミュテータと一極コンミュテータの間には回転角で 60 度分の無接続区間が設けられている。したがってコイルに印加される電圧波形は Fig.7 のようになり、方形波を基本とした三相交流電圧波形を発生することが出来る。

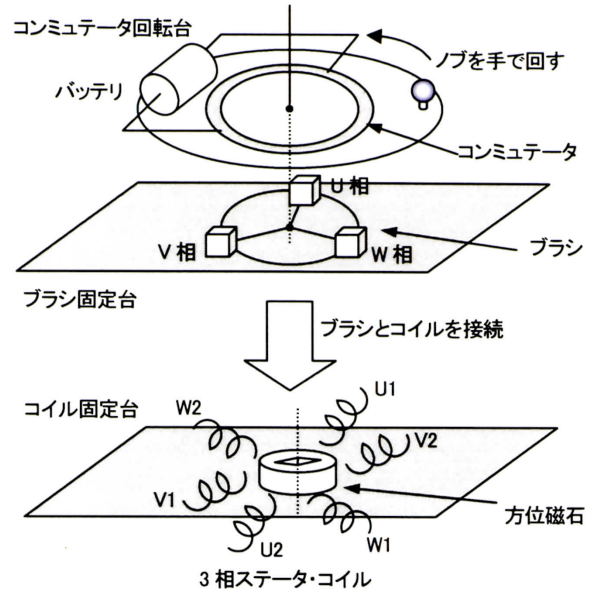


Fig.5 ブラシを使った回転磁界の発生教材

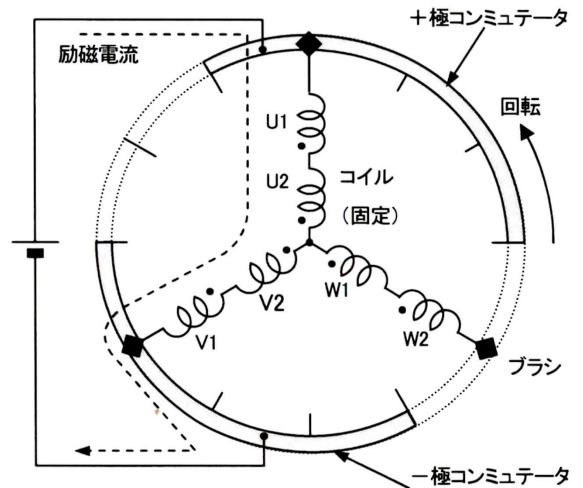


Fig.6 ブラシとコンミュテータの実体配線図

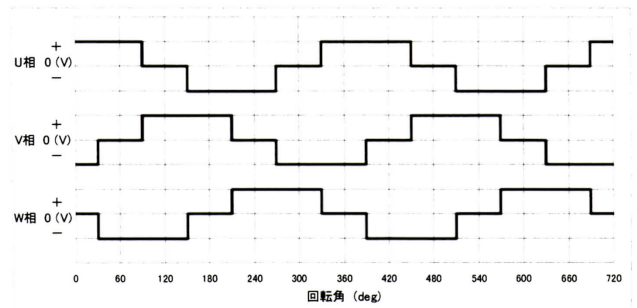


Fig.7 コイルに印加される三相交流電圧の波形

この波形による駆動方式は、実用においても出力特性や回転ムラの配慮が不要な用途の集中巻ブラシレス DC モータの駆動方式として応用されている。

この教材では、単に教材を動作させ、オシロスコープで Fig.7 の波形を観測するだけでは、学生が動作原理の理解に到達することは困難である予想される。そこで、Fig.6 のブラシ接続図と、Fig.2 のステータ・コイル実体配線図の両方を使って、学生に検討を行わせる。Table 3 に検討の手順を、Fig.8 に検討で利用するワークシートの例を示す。

Table 3 ブラシを使った回転磁界の発生方法の検討手順

手順	検討内容
①	Fig.6 でコンミュテータの回転位置とブラシの位置から「どのコイルに、どちらの方向に」電流が流れるのかを記入する。
②	Fig.6 の各コイルの電流の向きを、Fig.2 に転記して、各コイルの磁界の方向を調べ、「どちらの方向に」合成磁界が発生するかを調べる。
③	磁界の向きから方位磁石（ロータ）の向きを予想し、Fig.5 の教材で確認をする。
④	以上をコンミュテータが 1 回転するところまで、60 度単位で繰り返し行なう。最終的に、コイルの転流パターン 6 通りが得られる。

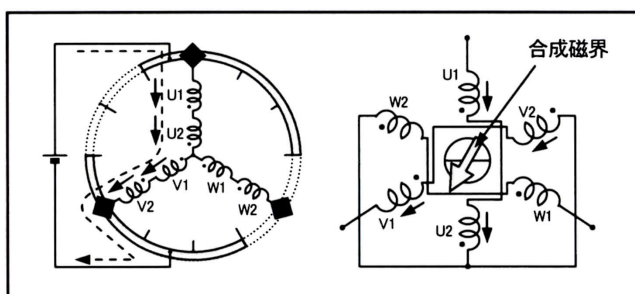


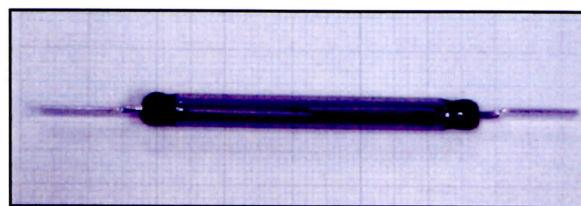
Fig.8 ブラシを使った回転磁界の発生方法を検討するワークシート

### 3.4. ブラシから磁気センサへの置き換え

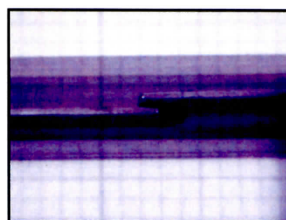
いよいよ最終段階として、ブラシを磁気センサとトランジスタスイッチに置き換えて三相全波モータ駆動回路を導入し、「ブラシレス」の構造に発展させる。

ところで、磁気センサとトランジスタは固体素子であるため、その動作を目や耳で感じるができない。よって、教材としてその動作を直感的に捉えることが困難である。そこで、磁気センサとトランジスタの代わりに「リードスイッチ」を採用することにした。リードスイッチとは、ガラス管内に封入された電極が、磁力線で開閉するようになっており、磁気センサとトランジスタスイッチを兼ねた働きが可能である。さらに、電極の動きを目や音で確認することが出来る。Fig.9 にリードスイッチの外形および動作状態を示す。

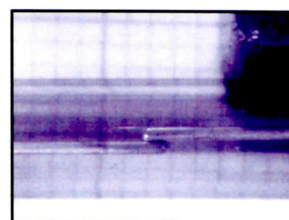
Fig.5 におけるブラシを、リードスイッチに置き換えた教材の概略図を Fig.10 に示す。



(a) 全体図



(b) 接点 OFF



(c) 接点 ON  
(右上の塊は磁石)

Fig.9 リードスイッチ

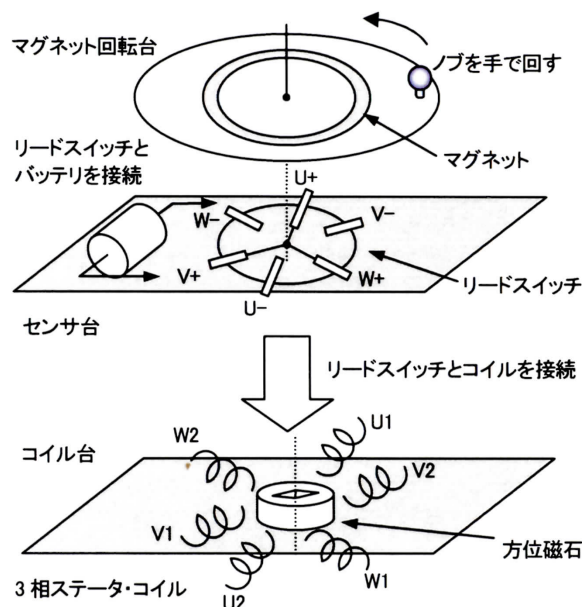


Fig.10 ブラシからリードスイッチへ置き換えた教材

リードスイッチの個数は、Fig.1 のブラシレス DC モータ回路のトランジスタスイッチとの置き換えなので 6 個必要となる。ブラシが不要となったため、コンミュテータの位置にはリードスイッチを駆動するマグネットを配置する。実際のブラシレス DC モータでは、ロータマグネット (Fig.10 では方位磁石に相当する) と、リードスイッチを駆動するマグネットは共通となるので、マグネット回転台そのものが不要となる。

リードスイッチの回路接続は、トランジスタのコレクタ・エミッタ端子と完全に置き換えられるため、Fig.1 のブラシレス DC モータ回路そのままとなる。また、リードスイッチが

磁気センサの役割も兼ねるため、3相転流制御回路と位置検出回路は不要となる。

また、リードスイッチの実体配置図、およびマグネット回転台上のマグネットの配置を Fig.11 に示す。

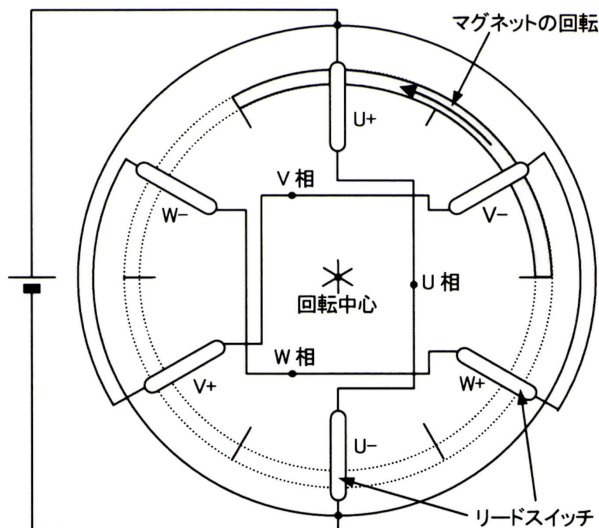


Fig.11 リードスイッチとマグネットの実体配置図

Fig.11 の図中の U 相, V 相, W 相の端子は, Fig.2 のステータ・コイルの実体配線図中の同一相の端子と接続される。

以上により, Fig.6 のブラシは, Fig.11 のリードスイッチに完全に置き換えられた。従って, コイルに印加される電圧波形も, Fig.7 と同一の 3 相交流波形となる。

この教材においても, 前節の教材と同様, 学生が動作原理の理解に到達することは困難である予想される。そこで, 前節と同様の手順でワークシート補助教材による検討が必要となる。この教材におけるワークシートは, Fig.11, Fig.1, Fig.2 の 3 つを使用する。Table 4 に検討の手順を, Fig.12 に検討で利用するワークシートの例を示す。

Table 4 リードスイッチによる回転磁界発生 の検討手順

手順	検 討 内 容
①	Fig.11 ではマグネットとリードスイッチの重なり方から, 接点が閉じているリードスイッチを調べる。
②	Fig.11 で接点の閉じているリードスイッチを Fig.1 に転記し, 各コイルの電流の向き調べる。
③	Fig.1 の各コイルの電流の向きを Fig.2 に転記して, 各コイルの磁界の方向を調べ, 「どちらの方向に」合成磁界が発生するかを調べる。
④	磁界の向きから方位磁石 (ロータ) の向きを予想し, Fig.10 の教材で確認をする。
⑤	以上をコンミュテータが 1 回転するところまで, 60 度単位で繰り返し行なう。最終的に, コイルの転流パターン 6 通りが得られる。

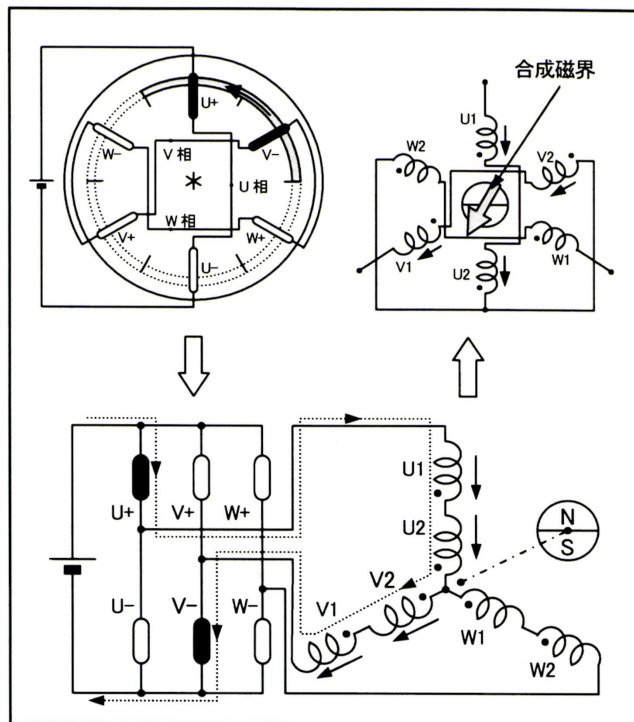


Fig.12 リードスイッチを使った回転磁界の発生方法を検討するワークシート

#### 4. 教材の試作について

前章で提案を行なった, ブラシレス DC モータの指導用教材について, 現在, 試作を行なっているところである。具体的な試作段階において, 問題となった幾つかの事項について, 報告を行なう。

##### 4.1. 永久磁石について

永久磁石が教材に使われている箇所は, Fig.3 の回転磁界を発生する部分と, Fig.10 のリードスイッチを開閉する部分の 2 箇所である。

回転磁界を発生する永久磁石では, 磁石の形状についてはあまり制限が無いが, 十分な磁力が必要である。方位磁石を回転させる程度であれば, 文具や小学生の理科実験用のコバルト系永久磁石で十分な結果が得られた。

しかし, トルク特性について検討するのであれば, さらに強力な永久磁石が必要となる。HV・EV で使用されているネオジウム系永久磁石は大変強力であり, トルク特性の実験には最適だが, 入手が容易ではないようである。現在, 判明した入手方法としては, 一部の 100 円ショップで直径 10mm, 厚さ 2mm 程度の円盤形状の物が「超協力マグネット」という商品名で販売されていた。また, コンピュータのハードディスクの磁気ヘッドを駆動するマグネットにネオジウム磁石が使用されており, 分解回収することが出来た。

#### 4.2. マグネットコイルについて

マグネットコイルが教材に使われている箇所は、Fig.4, Fig.5, Fig.10 の3ヶ所であり、Fig.5 と Fig.10 においては共通で使用可能である。

マグネットコイルは鉄心と線材を入手できれば容易に製作可能であるが、既製品の入手についても調査を行なった。ヒンジ型ソレノイドが最も使いやすい形状をしており、鉄心の直径が約 12mm、鉄心の長さが約 20mm、巻線の外径が約 25mm、の円筒径の物を入手することが出来た。Fig.13 に入手したマグネットコイルを示す。

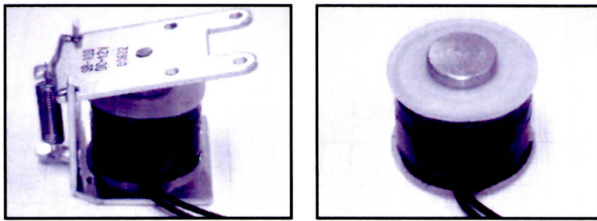


Fig.13 ヒンジ型ソレノイド

また、ソレノイド以外には、マグネットリレーを分解してコイルを入手することも可能であるが、大型の物は入手困難であり、分解時に破損する可能性もあり、良好とは言えなかった。

#### 4.3. ブラシについて

ブラシが教材に使われている箇所は Fig.5 のみであり、3相のコイルに接続するため3個必要である。

ブラシの材質および固定治具について検討した結果、やはり直流モータに使用されているブラシを分解して利用するのが最も容易であると考えられる。手始めに、自動車用スタータモータのブラシが入手できたが、形状が幾分大きいため、すべり摩擦が大きくなる可能性がある。これより小さな製品としては、ラジコン用モータのブラシが容易に入手可能である。

#### 4.4. リードスイッチについて

リードスイッチが教材に使われている箇所は Fig.10 のみであり、3相全波駆動を行なうため、6個必要である。

全くの特殊部品であるため、入手方法は、電子部品の取扱業者あるいは通信販売からの購入のみとなる。

また、試作の際に気付いた点として、リードスイッチを開閉するマグネットは、コンミュテータの形状を元としているため、120度角の帯状円弧にする必要がある。この方法としてシートタイプのマグネットをカットして使用してみたが、磁力が弱く、リードスイッチが開閉しなかった。現在のところ、ボタン形状の小型永久磁石を多数使って、円弧状に配列する方法で対応している。

#### 5. まとめ

本稿では、ブラシ付き DC モータまでを理解している学生に対して、ブラシレス DC モータを理解させるための、教育用教材および指導テキストの開発について検討結果を報告した。その結果、4つの学習段階の教育内容と、各段階で使用する指導教材、最後の2段階で使用する補助教材（ワークシート）について、具体的な提案を行なった。

今後は、指導教材の制作の完成、テキストの執筆を行い、実際に指導を行なう予定である。その際には、系統的なアンケート収集を行ない、学習効果を評価して、指導方法の改善に繋げて行きたい。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり「財団法人 東京自動車技術普及協会」の助成金を頂きましたことに感謝の意を表します。併せて、本研究の教材制作にあたり、部品の選定、構造や加工方法等において、貴重なアドバイスを頂きました本学教職員の皆様にも、この場をお借りしてお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- (1) モーターファン・イラストレーテッド編集部：電動自動車のテクノロジー —基礎知識と最新技術—, モーターファン別冊 Moter Fan illustrated, Vol.37, p.28-85, 2009
- (2) モーターファン・イラストレーテッド編集部：PRIUS Technology Details, モーターファン別冊 MFi 特別編集 Moter Fan illustrated トヨタ・プリウスのテクノロジー, p.4-87, 2009
- (3) トヨタ自動車(株) 編：TOYOTA 電子技術マニュアル トヨタ プリウス ZVW30系, 2009
- (4) 飯塚 昭三：バッテリー及びモーターに関する基礎知識, 燃料電池車・電気自動車の可能性, 東京, グランプリ出版, 2006, p.33-74
- (5) トランジスタ技術編集部 編：小型 DC モータの基礎・応用, 東京, CQ 出版社, 2009, p.242