

界磁コイルに通電しなくとも回転する小型整流子電動機の 不思議な動作機構

櫻井 勇良*

Wonderful and rotating motion mechanism of small commutator motor that field coil is not energized

Yuryo SAKURAI

Abstract:

Using the small commutator motor of which the type differed, verification experiment of rolling mechanism was carried out. The result showed rotating, even if only the rotor is energized. Then, it was confirmed that the rotation's direction in this case was reverse direction in usual case. The magnetic flux density distribution in field coil and stator was measured in order to examine this reason. As a result of examining using those results, it was clarified that product state (way of working of attractive force and repulsive force) of electromagnetic force which arises by electromagnetic induction differed.

KEY WORDS: Small commutator motor, Magnetic flux density distribution, Electromagnetic force

要旨:

タイプの異なる小型整流子電動機を用いて、回転機構の検証実験を行った。その結果、回転子のみに通電しても回転することがわかった。そして、この場合の回転方向が、通常の場合の逆方向なることを確認した。この理由を検討するために、界磁コイルや固定子における磁束密度分布を測定した。それらの結果を用いて検討した結果、電磁誘導によって発生する電磁力の生成状態（引力及び反発力の働き方）が異なることを明らかにした。

キーワード: 小型整流子電動機、磁束密度分布、電磁力

1. はじめに

以前、筆者は、小学校第6学年で学ぶ単元「電気の利用」における電気製品の活用に関する提言を行った¹⁾。この提言は、筆者が担当している授業において廃棄処分になった電気製品を活用した経験に基づいている。本稿もその経験に基づいている。

ある授業において、電気掃除に用いられている小型整流子電動機（以下電動機と略す）を教材とした授業を展開することを考えた。授業の何日か前に、

そのための予備実験を行い、ファンの回転方向に2種類あること、回転方向は異なるが風の通り道は同じになること、などを確認して当日授業に臨んだ。

ところが、当日、複数の電動機を回したところ、事前に調べた結果と異なる方向に回転する、すなわち風の通り道が逆になるものが含まれているのがわかった。その時、その理由がわからなかったのもので、その電動機を除いたものを使って授業を進めた。

授業終了後、気になったので風の通り道が逆になる理由について検討を行った。

まず、授業中に起きた事象の検証を行ったが、間

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科 准教授

違いではなく、やはり同じよう結果になった。そこで、構造的な違いがあるのではないかと思い、電動機を分解して調べた。その結果、全ての電動機は、電源線、界磁コイル、ブラシが全て直列に結線されるが、見た目にわかるように結線される場合（後述する図 3 (a)）と電源線、ブラシ（単なる中継）、界磁コイル、ブラシという経路で結線してある（後述する図 3 (b)）ものがあるのがわかった。

次に、間違えて通電させた時、どのような回路になっていたかを調べた。その結果、界磁コイルを通さずに回転子を挟む 2 つのブラシ間に電圧を印加させていたことがわかった。

さらに、何故、結線を間違えたのかについて当時を思い出しながら検討した。その結果、電源線がブラシの近くに配置されていたことが原因であることがわかった。つまり、ブラシを中継している電源を見分けることができず、そのブラシに接続されている導線（後述する図 3 (b) の図中で黒く塗りつぶしてある部分）を電源線と勘違いした可能性がある。したがって、界磁コイルを通さずにブラシ間に電圧を印加させてしまった。その結果、予備実験の結果と異なる結果、すなわち風の通り道が逆になるという結果になったものと考えられる。

以上のように、電動機を使った授業を展開しようとして行った予備実験の結果と異なる事象に遭遇したことをきっかけにして、その原因を調べた結果次のようなことが検証できた。

1) 結線ミスが原因である、2) 通常は行わないブラシ間への通電でも回転する、3) ブラシ間通電の場合、通所の場合と回転方向が逆になる、4) 通常の場合、回転子と界磁コイル間における電磁作用により回転が起きるが、ブラシ間通電の場合は、回転子と固定子間における電磁作用により回転が起きる。

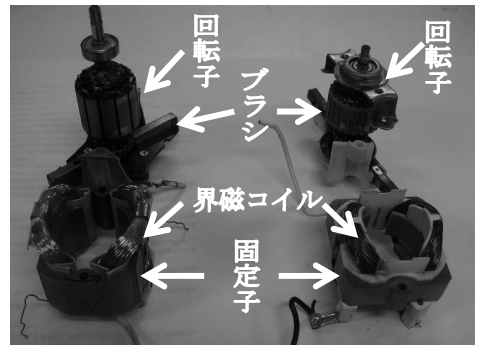
これらは、この電動機の回転機構を理解する上で有用な結果といえる。特に、通常の場合とは異なるブラシ間通電における動作の検証及びその機構に関する知見は貴重である。以下では、上述した検証事項について、少し詳しく述べる。

2. 実験方法および実験結果

2.1 電動機の取り出しと分類

この電動機の基本構造は、図 1 に示してあるように回転子、それを囲む固定子によって構成される。固定子には、回転子を両側から対照的に挟むように配置してある。片方の界磁コイルを通った電流は、ブラシ、回転子を通り、もう片方の界磁コイルを通じて電源に戻る。この電動機は、直流でも交流でも

動作する。



(a) 試料 A

(b) 試料 B



(c) 試料 C

図 1 小型整流子電動機の
固定子・回転子などの様子

これまでに取り出した電動機 24 台について、内部構造を調べながら、回転方向ごとに分類した。形状や配置が若干異なるものもあったが、使われている主な部品（固定子、2 つの界磁コイル、2 つのブラシ、回転子、ファンなど）は同じであった。

大別すると、ブラシの配置が 3 種類存在するのがわかった（図 1 参照）。一つは、図 1 (a) のように、向かい合っている界磁コイルのほぼ中央にブラシが配置され、回転子を挟むようになっていた（22 台）。残りの 2 つは、図 1 (b) のように、向かい合った界磁コイルの中央から右側に約 40 度の位置（1 台）および図 1 (c) のように左側に約 30 度ずらしてブラシが配置（1 台）されているものであった。

また、ファンの回転方向は、構造のタイプに関係なく、時計方向（2 台）と反時計方向（22 台）の 2

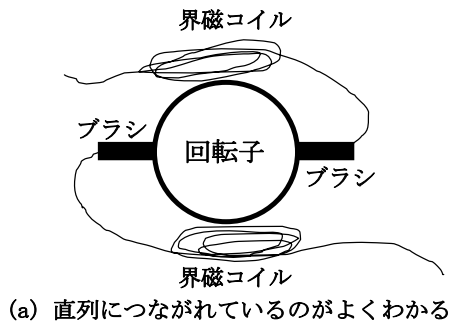
界磁コイルに通電しなくとも回転する小型整流子電動機の不思議な動作機構（櫻井）

種であった（図2参照）。さらに、細かなことであるが、結線の仕方が2種類あった（図3参照、(a)が14台、(b)が10台）。実は、筆者がこれまで取り出したものは、(a)のみであった。しかし、その後取り出したものの中には、(b)のものがあつた。上記した予想外の回転方向の存在は、(b)の存在を見過ごしたためであった。

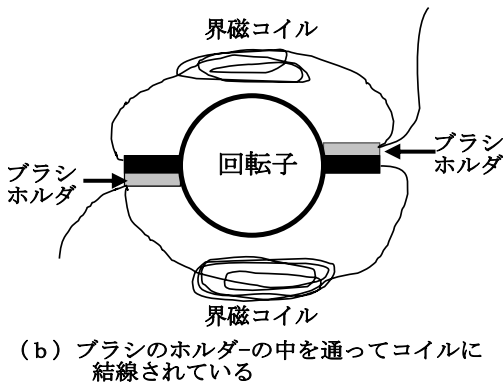


(a) 右回り
(時計方向) (b) 左回り
(反時計方向)

図2 小型整流子電動機のファン



(a) 直列につながれているのがよくわかる



(b) ブラシのホルダーの中を通してコイルに結線されている

図3 小型整流子電動機の結線の様子

2.2 界磁コイルおよび回転子の磁束分布の測定方法

この電動機は、通電による磁界の反発・吸引力を使って回転する。したがって、回転方向を検討する

ためには、界磁コイルおよび回転子における磁界の生成状況を把握する必要がある。



図4 磁束密度の測定の様子

そこで、直流安定化電源を用いて通電させ、それによって発生する磁束密度を測定することにした（図4参照）。磁束は、磁束計（MODEL GM-2430D、電子磁気工業(株)、N極の場合は正の値、S極の場合は負の値を示す）で測定する。通電電流は、任意に約1.5Aとした。界磁コイルの場合は、歪曲面に沿ってセンサを移動させながら数値（ $\times 0.1$ mT）を読んだ（代表的なものとして、両端および中央の3か所の数値を記録した）。回転子の場合は、金属の片を目印にして、その部分における磁束を測定する（金属片の数だけ測定する）。測定場所は、界磁コイルと対面する部分のほぼ中央にした。測定は、厳密な値を求めるというよりは、おおよその分布を把握するために行った。

2.3 実験結果および考察

2.3.1 試料Aについて

図5に試料Aにおける結果を示す。通電は、通常の接続の状態で一方向に電流が流れた場合を想定して行った（（正）界磁コイル2（負） \rightarrow （正）ブラシ1 \rightarrow 回転子 \rightarrow ブラシ2（負） \rightarrow （正）界磁コイル1（負）、（正）および（負）は直流の極性である）。測定した場所とそこにおける磁束密度の値を記入してある（mTは省略した。正の値はN極、負の値はS極を示す）。この図のポイントは、界磁コイルと向き合っていない回転子の部分における磁束密度の大きさと磁極の種類と近接する界磁コイルの磁極の種類（S極かN極か）である。両者の磁極の種類を見ることが、両者に働く力の種類（吸引・反発）がわかる。そして、それによって、回転方向もわかると考えられる。

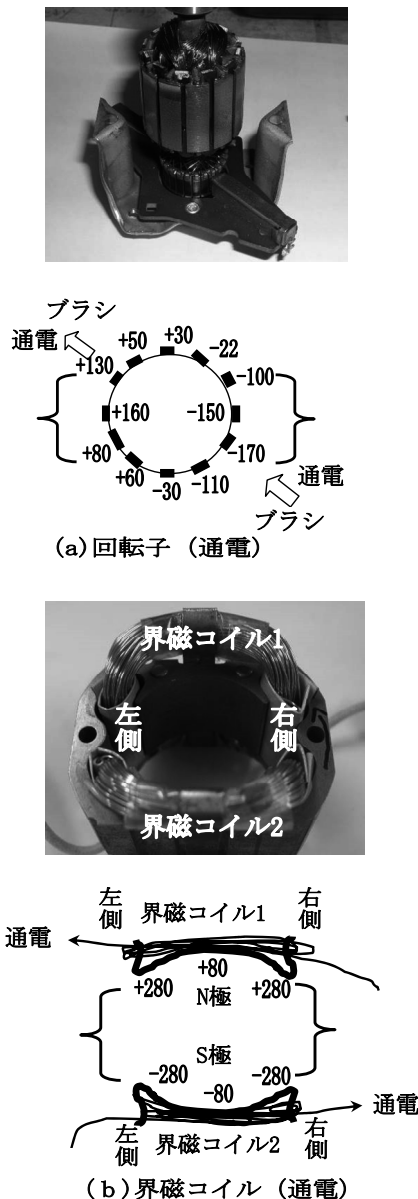


図 5 試料 A の磁束密度分布

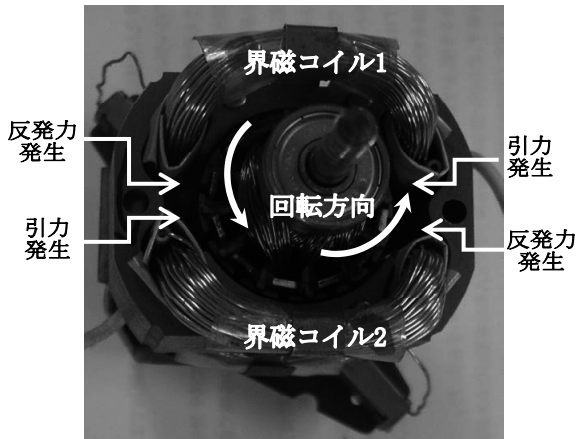


図 6 試料 A における回転方向の確認(通常通電時)

これらの視点で、通常に通電を行った図 5 を見ると、界磁コイル 1 の両側が 280 mT となり、それに近接する回転子は、図の右側が負の値(S 極)、図の左側が正の値になっている。したがって、界磁コイル 1 の右側付近では引力が、界磁コイル 1 の左側付近では反発力が回転子に加わる。

一方、界磁コイルに 2 からは、界磁コイル 2 の右側付近では反発力が、界磁コイル 2 の左側付近では引力が、回転子に加わる、すなわち界磁コイル 1 と逆の力が作用する。

それをまとめると、図 6 のように、反時計方向に回転することが考えられる。この回転方向は、実際の回転方向と同じである。このことから、回転方向は、界磁コイルと回転子に生成する磁界の力(引力)に依存していることが確認できた。これは、直流電動機の電流と回転方向の関係と同じである、つまり、固定子の磁界と回転子との磁界の間に生成する引力によって回転方向が支配されることと同じである。

次に、通常は行わないが、試行という意味で界磁コイルを介さない(固定子はそのままの状態)でブラシ間に通電した場合、正常な接続の回転方向と逆になることについて述べる。この場合、回転子にできる磁界のみでは回転しないので、他の要因が必要になる。考えられるのは、固定子に残存する磁気である。

そこで、調べた結果、残存磁気は検出できなかった(交流電流なので当然といえる)。次に考えられるのは、回転子の磁界による固定子への磁気誘導現象である。この可能性に着目して述べる。

界磁コイルを通さずに、ブラシ間に通電した場合は、回転子に発生する磁界によって固定子が磁化さ

れ、それによる影響が回転方向を支配すると考えられる。したがって、回転子に生成する磁界の様子と固定子の配置がポイントになる。

ここでも、界磁コイルの右側・左側に注目する（図7参照）。まず、界磁コイル1・2の右側を見ると、回転子がいずれも負の値（-22 mT（界磁コイル1）、-110 mT（界磁コイル2））になっているので固定子にはN極がそれぞれ誘導される。そして、界磁コイルと対面していない直近の回転子の部分と磁化した固定子との間で引力が発生することが考えられる。その時、界磁コイル1側の数値（-100 mT）より界磁コイル2側の数値（-170 mT）の方が大きいので、界磁コイル2の方に回転子が引きつけられることが考えられる。

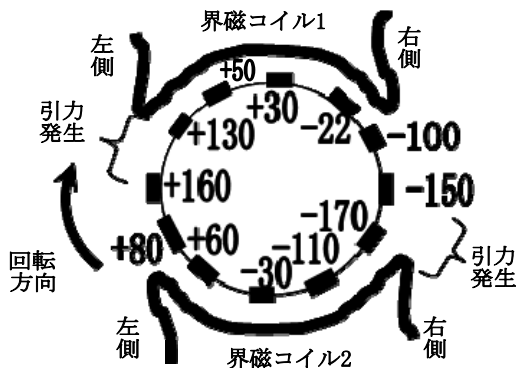


図7 回転し飲み通電時の試料Aにおける回転子の磁束密度分布及び回転方向の確認

一方、界磁コイル1・2の左側を見ると、回転子がいずれも正の値（50 mT（界磁コイル1）、60 mT（界磁コイル2））になっているので固定子にはS極がそれぞれ誘導される。そして、界磁コイルと対面していない直近の回転子の部分と磁化した固定子との間で引力が発生することが考えられる。その時、界磁コイル1側の数値（130 mT）より界磁コイル2側の数値（80 mT）の方が小さいので、界磁コイル1の方に回転子が引きつけられることが考えられる。

これらのことをまとめると、界磁コイルの右側では、界磁コイル2の方へ、界磁コイルの左側では、界磁コイル1の方へ、回転子が引力を受けて回ると考えられる（時計方向）。

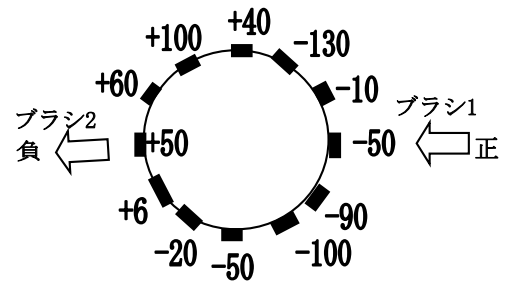
以上のことから、ブラシ間に通電した場合、回転子の回転方向が、通常の動作時（反時計方向）と逆方向になったのは、上記のように回転子に生成する

磁界とそれによって磁化される固定子との間に生まれる引力の相互作用によることが確認できたといえる。通常の場合は、界磁コイルとの引力・反発力によって回転子の回転方向は支配されるが、界磁コイルがない場合は、固定子にできる磁気誘導磁界がその役割を果たしているといえる。

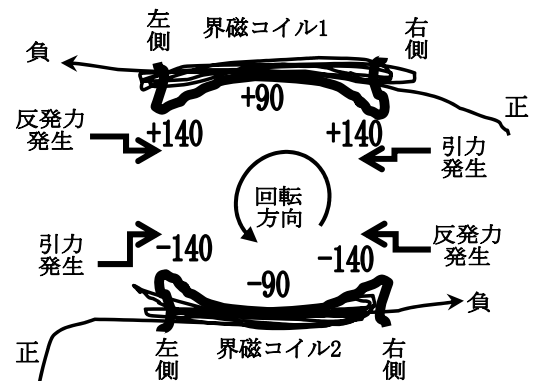
そこで、全試料について界磁コイルを介さないで通電した場合の回転の有無を調べた結果、回転するものが試料B・Cを含めて5台見つかった。回転方向はいずれも通常時と逆方向であった。それらについて、上記と同じ視点で測定および考察した結果、上記した試料Aの場合と同じ傾向が見られた。以下では、試料Cに関する結果の一部を述べる。

2.3.2 試料Cについて

図8に試料Cにおける回転子および界磁コイルの結果を示す。測定した場所とそこにおける磁束密度の値を記入してある（mTは省略した）。



(a) 回転子（通電）



(b) 界磁コイル（通電）

図8 試料Cの磁束密度分布

図8において2つの図を重ねて見ると、界磁コイル1・2の右側は、界磁コイル2の方で反発力が、界磁コイル1の方では引力が回転子に作用する。一方、界磁コイル1・2の左側では、界磁コイル2の方で引力が、界磁コイル1の方では反発力が回転子に作用する。これらの力をまとめると、図中に示すように反時計方向に回転子が回ることが考えられる。これは、実際の回転方向と同じである。

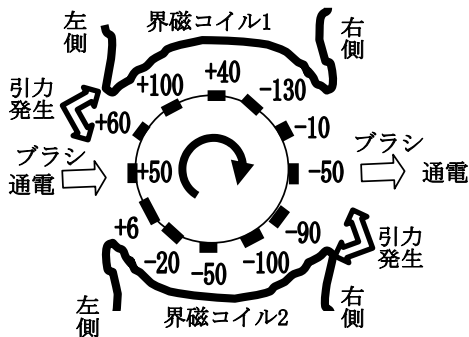


図9 試料Cにおける回転方向の確認
(界磁コイル無し)

次に、界磁コイルを通さずに、ブラシ間に通電した場合について述べる（図9参照）。まず、界磁コイル1・2の右側を見ると、回転子がいずれも負の値（-130 mT（界磁コイル1）、-90 mT（界磁コイル2））になっているので固定子にはN極がそれぞれ誘導される。そして、界磁コイルと対面していない直近の回転子の部分と磁化した固定子との間で引力が発生することが考えられる。その時、界磁コイル1側の数値（-10 mT）より界磁コイル2側の数値（-50 mT）の方が大きいので、界磁コイル2の方に回転子が引きつけられることが考えられる。

一方、界磁コイル1・2の左側を同じ視点で見ると、回転子がいずれも正の値（60 mT（界磁コイル1）、6 mT（界磁コイル2））になっているので固定子にはS極がそれぞれ誘導される。そして、界磁コイルと対面していない直近の回転子の部分と磁化した固定子との間で引力が発生することが考えられる。その時、界磁コイル1側の数値（60 mT）より界磁コイル2側の数値（6 mT）の方が小さいので、界磁コイル1の方に回転子が引きつけられることが考えられる。

これらのことをまとめると、界磁コイルの右側では、界磁コイル2の方に、界磁コイルの左側では、界磁コイル1の方に、回転子が引力を受けて回るよ

うになると考えられる（時計方向）。

以上のように、正常時における回転子の回転方向が回転子と界磁コイルの磁界の相互作用によることが確認できた。また、界磁コイルを通さず、回転子のみに通電した場合、回転するものとしらないものがあり、回転する場合は、正常時と逆方向になることがわかった。さらに、回転しの方の通電を繰り返した場合、通常の通電状態に戻しても回転方向が元に戻らない場合もあることがわかった。これらの違いについては今後の課題である。なお、確認のために、固定子・界磁コイルを取り除いた状態で、ブラシ間に通電した結果、“ブーン”という音のみが発生し、回転子は回らなかった。このことから、界磁コイルを介さないで通電した場合、回転子が回転するためには、固定子（ケイ素鋼板）が必要であることが確認できた。

3. まとめ

以上のように、電気掃除機の電動機を用いた授業において、思いがけない事象（予備実験の時とは異なる方向に回転した）に遭遇したことをきっかけにして検証実験および動作機構の解明を行った結果、多くの知見が得られた。特に、界磁コイルを通さずに、回転子のみに通電した場合、原理的には回転しないはずであるが、回転する場合と回転しない場合とがあることを明らかにしたのは、意義深いことである。恐らくこのような実験を行った報告はないと思われる（少なくとも筆者は聞いたことがない）。

原理的には回転しないはず、すなわち回転子のみに通電した場合の回転機構について述べたが、提案した機構が正しければ、界磁コイル不要の新たなタイプの電動機が開発できる可能性がある。これらは今後の課題である。

なお、市販されている電磁掃除機は、電動機の回転方向に関係なくノズルから空気を吸引するように決められている（図2参照）。したがって、今回のように結線を変えた場合、本来の回転方向が変わるのでノズルから空気が吸引されず排気されるようになる。つまり、送風機の機能を持つようになるのでご注意ください。

参考文献

- 1) 櫻井勇良：応用物理教育, 38(1), pp. 67-68 (2014)。