

## 動画解説！

### 「電気と磁気のチカラ ～磁界ってなんだ？ファラデーのパラドックス～」

2024年8月

(一社)電気学会 社会連携委員会 動画ワーキンググループ (WG)

#### 1. はじめに =動画制作の目的=

学校教育において、磁界について最初に学習するのは中学校 2 年の理科「電流がつくる磁界」の章である。そして高校物理の「電流と磁場」の章で詳しく学習することになる。

電気や磁気の学習では、「目に見えないから難しい、わかりにくい」と言われることがあるが、教科書などでは磁界を可視化するために、磁石や電磁石の周りに砂鉄をまきトントンと振動を与えると N 極から S 極にかけて現れる線を「磁力線」と説明している。

しかし、本当に「磁力線」という線はあるのかということ、そのような線は存在しない。ご承知の通り、磁力線は、あくまでも磁界の強さと方向を示す記号で、

- ・ N 極から S 極に向かう矢印で表す
- ・ 線の間隔が狭いところほど磁界が強く、広いところは弱い
- ・ 途中で交わったり枝分かれしたりしない

という性質を表すもので、天気図の等圧線や地形図の等高線と同じようなものである。

2024 年 4 月に電気学会 IEEJ YouTube チャンネルで公開した動画「電気と磁気のチカラ～磁界ってなんだ？ファラデーのパラドックス～」<sup>1)</sup>は、この「磁力線」について、教わる側も教える側も一緒に考えていただき、磁界（磁場）への理解を深める一助となればという思いで制作した。

なお、この動画は、「ファラデーのパラドックス」という実験結果をクイズ形式で一緒に考える内容となっているため、まだ動画をご覧いただいていない方は、この解説を読む前に動画をご覧いただき、そのパラドックス（逆説）を体感してからじっくり解説を読んでもらいたい。

#### 2. ファラデーディスク

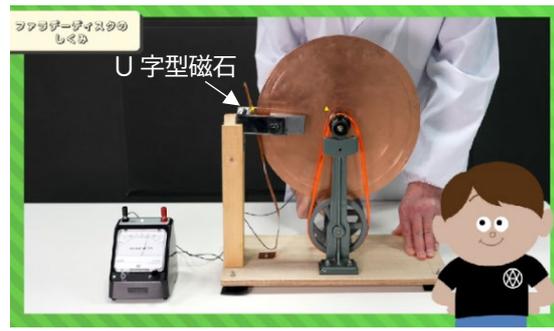
##### 2-1. マイケル・ファラデーの発見

動画の導入部では、世界で最初の発電機であるファラデーディスク (図 1) を取り上げた。

1831 年、イギリスの科学者マイケル・ファラデーは、電磁誘導<sup>2)</sup>を発見した<sup>3)</sup>。さらに同じ年の 10 月、継続的に電気を発生させることはできないか、と考えたファラデーは、U 字型磁石の N 極と S 極の間で金属の円板（ディスク）を回転させる装置を作り、円板を回転させると磁石付近の円板の縁と、軸に接触させた針金の間に電気が生まれる（電位差が生じる）ことを発見した<sup>4)</sup>。これが、世界初の発電機「ファラデーディスク」である。動画では、動画 WG メンバーが本動画のために製作したファラデーディスク模型 (図 1(b)) を使用している。



(a) 国立科学博物館に展示されている復元模型  
(画像提供：国立科学博物館)



(b) 動画で用いた模型

図1 ファラデーディスク

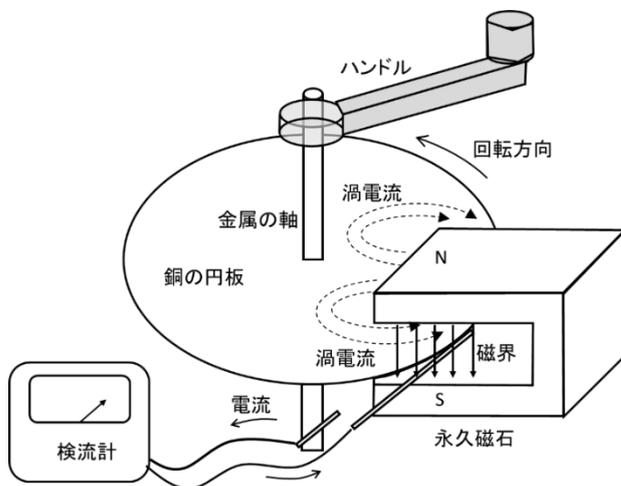


図2 ファラデーディスク実験装置の概略図

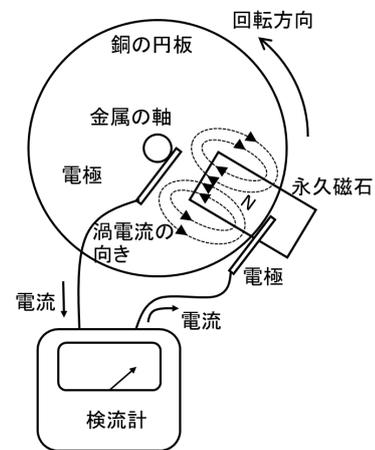


図3 円板を上から見た図

## 2-2. ファラデーディスクの発電の仕組み

ファラデーディスク実験装置の概略図を図2に、円板を上から見た図を図3に示す。なお、本動画では、起電力の発生を確認するため検流計（ナリカ製，GM-6000）を用いた。

例えば、図のように銅の円板を反時計回りに回転させると、円板が磁石から出ようとする場所では右回りに、磁石に入ろうとする場所では左回りに渦電流が流れ、円板の回転方向を逆にすると渦電流の向きも逆になる。

このように磁石の間を銅の円板を回転させると、渦電流が流れる。つまり起電力が生じ、円板の縁と円板中央の金属の軸と電極を接触させると矢印で示した方向に電流が流れる。

実は、ファラデーがこの発電機を発明する以前、1824年にフランスの物理学者フランソワ・アラゴが糸に吊るした銅の円板の下に磁石を近づけたところ、磁石を動かした方向に円板が動いたという現象を発見している（アラゴの円板）。このとき、磁石に引きつけられないはずの銅板がなぜ動いたのかは、説明のつかない謎とされていたが、ファラデーはこの奇妙な現象は電磁誘導によるものではないかと考え、ファラデーディスクの製作に結びついたという<sup>5)</sup>。

### 3. ファラデーのパラドックス（ファラデーパラドックス）

ファラデーのパラドックスとは、図4のように磁石、銅の円板、検流計そして回転機構を用意し、銅の円板の中心と縁にリード線の電極を接触させ、①磁石も円板も止まっている、②円板だけを回転、③磁石だけを回転、④磁石と円板をくっつけて一緒に回転させる、という4つの条件で、どの場合に電流が流れるか（起電力が発生するか）を問う実験である<sup>6)</sup>。

それでは実験の結果を見てみよう。①の場合、磁石も円板も止まっているので、当然電流は流れない。次に、②の円板だけが回転する場合は、磁界の中を円板内の自由電子が運動するため電流が流れる。そして、③はどうか、②の円板と磁石を逆にしただけなので、磁力線が回転して円板内の自由電子に影響を与え、電流が流れる、と考えたくなるかもしれないが、結果は流れない。最後に、④の場合は、円板と磁石がくっついて一緒に回転するため、①と同じイメージで電流は流れない、と考える方がいるかもしれないが、結果は流れる。

このパラドックスを考えると、磁力線をイメージすると、③や④の場合のように誤った結果を想像してしまう可能性があるが、あくまでも磁力線は磁界を理解するための表記方法であることをここで改めて確認していただきたい。

この結果を整理すると、電流が流れるときに磁石の動きは関係なく、銅の円板が回転しているときに電流が流れることがわかる。磁石の磁界は軸対象であって、止まっていようと回転していようと磁界の変化はないので、磁石だけを回転させる③の実験では、ローレンツ力（ローレンツ力については付録参照）は生じず、電流は流れない。

一方、④の実験でも、③の実験と同様に磁石が止まっていようと回転していようと磁界に変化はないが、円板が回転し、円板の中の自由電子が運動しているためローレンツ力が作用し、電流が流れるのである。

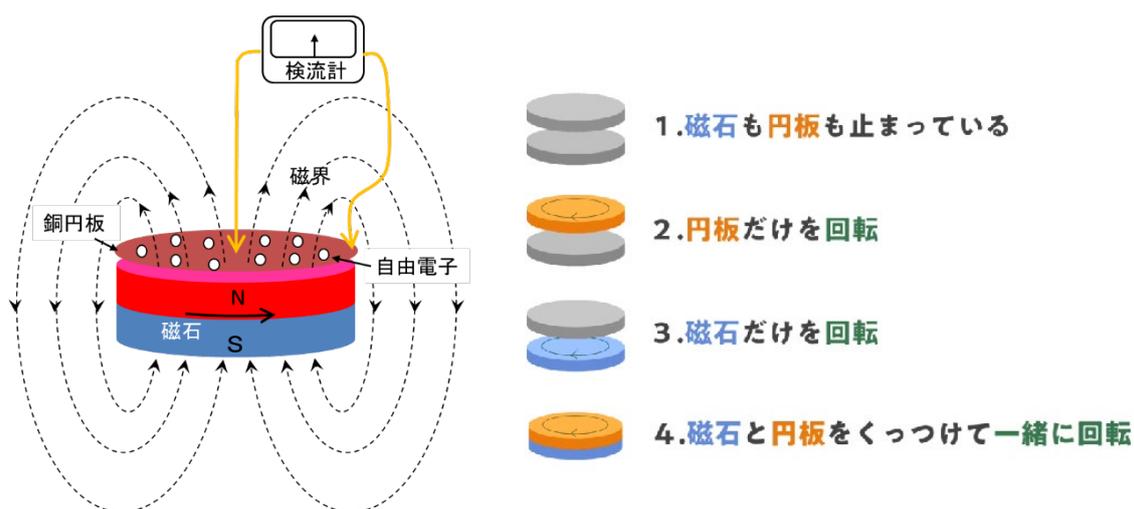


図4 ファラデーのパラドックスの実験と4つの条件

円板が回転している際の自由電子の動きを図 5 に示す。図 5(a)は、円板が反時計方向に回転したときの自由電子の動きを示したもので、回転軸の中心方向に電子が集まるため、中心付近はマイナスとなり周辺部はプラスとなる。一方、図 5(b)のように時計方向に回転させると自由電子は縁方向に移動するため中心付近はプラスとなり周辺部がマイナスとなる。なお、発生する電流の大きさは円板の回転数に比例する。

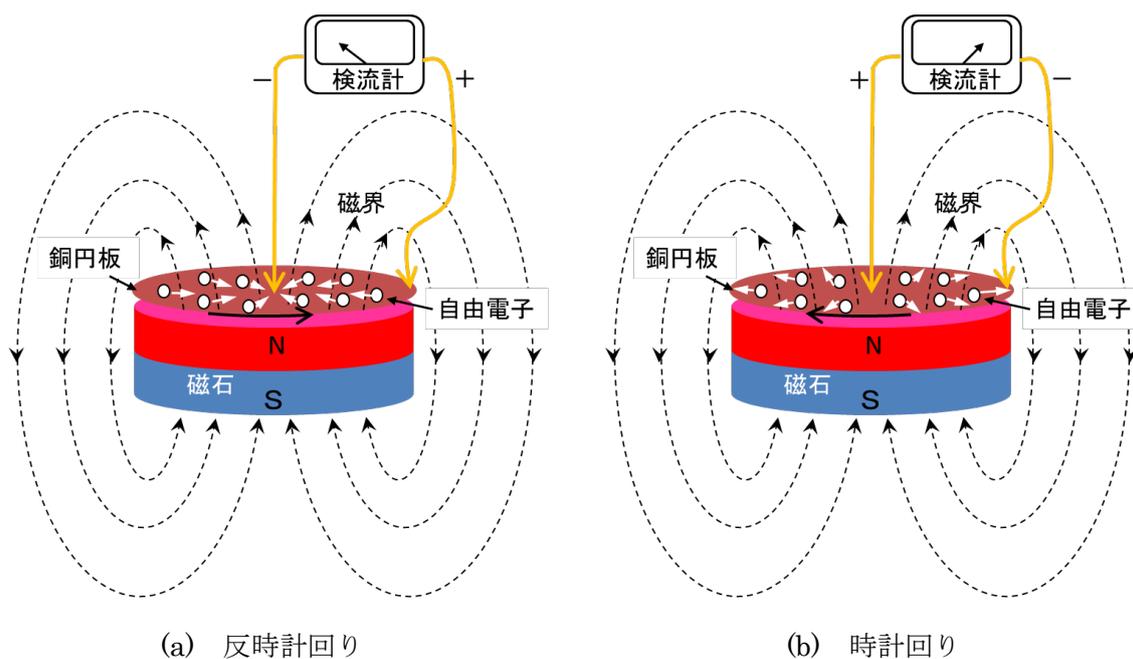


図 5 円板の回転によりローレンツ力を受けて自由電子が動くイメージ図

<参考文献>

- 1) 電気学会 IEEJ YouTube チャンネル, 電気と磁気の子カラ ～磁界ってなんだ?ファラデーのパラドックス～, <https://youtu.be/ySbJYDvqoGM>
- 2) 電気学会 IEEJ YouTube チャンネル, 電気と磁気の子カラ ～電磁誘導って何?～, [https://youtu.be/Cg42gQ3\\_t9Q](https://youtu.be/Cg42gQ3_t9Q)
- 3) 電気学会, 電気の知識を深めようシリーズ Vol.3 電気の基本を考えてみよう, pp. 17-19
- 4) 大日本図書: 昭和 53 年度中学校理科 2 年, p. 115
- 5) TDK, No.4 手回し発電機にみるハイテク今昔物語, 電気と磁気の子館, <https://www.tdk.com/ja/tech-mag/hatena/004>
- 6) 唐沢 好男, 電磁気学の奥深さ(22): ファラデーのパラドックスを考える, 謎解き電磁気学, [http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-081\\_Faraday-Paradox.pdf](http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/TR-YK-081_Faraday-Paradox.pdf)

## 付録：ローレンツ力

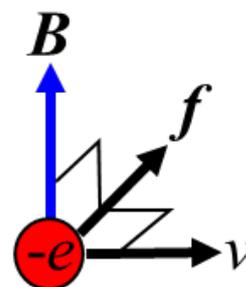
ローレンツ力とは、移動する電荷 ( $q$ ) が電界 ( $E$ ) と磁界 ( $B$ ) から受ける力のことである。ファラデーのパラドックスの実験では、移動する電荷は自由電子であり、電界は無いので、磁界内を移動する電子が受ける力がローレンツ力になる。

右図のように、 $-e$  [C] の電子が速度  $v$  [m/s] で磁束密度  $B$  [T] の磁場中を垂直に動くとローレンツ力  $f$  [N] の力を受ける。

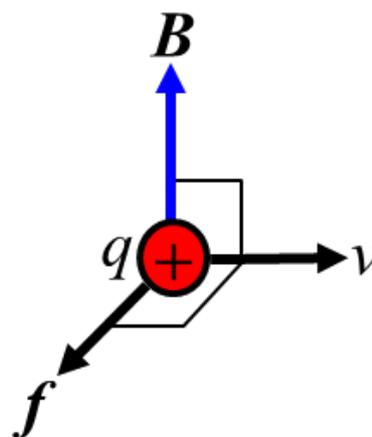
式で書くと  $f = evB$  となる。

また  $q$  [C] の正電荷の場合は下の図のように力の向きは逆方向になる。

式で書くと  $f = qvB$  となる。



電子のローレンツ力の方向



正電荷のローレンツ力の方向

2024年8月 (一社)電気学会 社会連携委員会 動画WG作成

電気学会 IEEJ YouTube 「電気の知識シリーズ」 URL :

<https://youtube.com/playlist?list=PLwP8MBUqHNIJ9K4gJjQcNWMq7-PnaNWbK&si=L-Rm7gFwY3HcBVCX>

その他の動画「電気の知識シリーズ」および解説書等 : <https://renkei.iee.jp/video>