

# 電磁気学の不思議探検

## 第4講 ファラデーに学ぶ電磁誘導の法則

電気通信大学名誉教授  
唐沢 好男

本シリーズでは、電波技術の基礎：電磁気学の世界に足を踏み入れ、そこにある不思議を探検している。本講は電磁気学の根幹を支える電磁誘導の法則を取り上げ、法則発見者のファラデー目線で動作の仕組みを見てみたい。類似の現象にファラデーのパラドックスと呼ばれる単極誘導がある。キーワードは「導線が磁力線を切る」、切ると何が起きるのだろう。



### 👉 電磁誘導の発見

1820年、デンマークのエルステッドは電流が流れている針金のそばで磁針が触れることごとに気づき、電流の磁気作用、つまり、電気から磁気が発生することを見出した。これに鼓舞されたイギリスのファラデーは、強い磁石のそばに針金を置けばそこに電流が流れるかもしれないと、いろいろの構成を試みたがうまくゆかなかった。試行錯誤すること十年(1831年)、長さ203フィート(約62m)の銅線一本を大きな木片にぐるぐる巻きつけ、もう一本をその隙間に接触しないように巻き付けたものを作り、一本を検流計(ガルバノメータ)に繋ぎ、他方をボルタ電池に繋いだ。そうすると電池に繋いだ瞬間、検流計がわずかに振れた。同様に、電池からはずした瞬間も僅かに振れた。このことから、磁力線の強さが変化する瞬間だけ、電気が発生すると気づいた。この発見の後、レンツやノイマンの努力によって、ループ状の導線に発生する起電力(=ループの両端に現れる電圧) $V$ (単位:ボルト)は次式になることが分かった。

$$V = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

式中の $\Phi_m$ はループが作る面を貫く磁力線の数(正確には磁束の総量、単位:ウェーバ)、マイナスがつくのは、磁力線の増加を防ぐ向きに電流が流れるように起電力が発生すると言う意味。この式は、大変すばらしい式で、その後のあらゆる実験に対して例外なく成立するため、電磁誘導の法則(あるいはファラデーの電磁誘導の法則)と呼ばれている。

### 👉 ファラデーは考えた

ファラデーは、電磁現象に対して電気力線や磁力線を思い描き、近接作用論(場の概念)を膨らませて行った。力は途中の媒質を一步一步進みながら相手に伝わるという考え方である。離れたところに正と負の電荷があるとき、電荷同士がお互いに引き合っているのではなく、電荷からはその電気量に応じた数の電気力線が出ていて、それが、周囲に電氣的歪みを持つ空間(電場)を作り、そこに別の電荷があれば、その歪みによって力が働く、と考えるのである。

ファラデーは(1)式が不満であった。導線に起電力が生まれると言うことは、導線に直接何かが作用しているはずであるが、(1)式の右辺は導線で囲まれた面を通過する磁束の総量(の時間変化)なのだから、導線と離れた場所の性質になっている。導線の現場で何が起きているのだろう、これが知りたかった。図1を見てみよう。棒磁石の上に導線ループがある。磁石を固定して導線ループを上下に動かせば、ループ面を貫く磁力線の数が変化し導線に誘導起電力が発生する。導線を固定して磁石を上下に動かしても同様である。思考をめぐらせたファラデーは、「起電力は導線が磁力線を切るときに生まれる」と考えた。導線が磁力線を切るとき、ガリッと音がでるらしい。ファラデーにはこのガリガリ音が聞こえ、その大きさに起電力を見ていたのであろう。

導線ループが動く場合を考える。図で下向きにループを動かすとしてみよう。ループ内の磁力線の数の変化は導線の動きを立体的に捉えた円筒の側面から出てゆく磁力線の本数になり、導線が切る磁力線はここに現れ

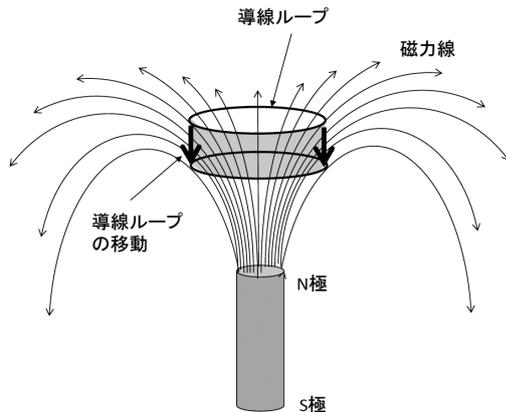


図1 電磁誘導：起電力は導線が磁力線を切る頻度に比例する

る。導線を固定し磁石を動かしても、相対的に、上記の説明と同じことになる。比例係数は別途定めることにすれば、ファラデーの考えは(1)式で与えられる現象を導線上の出来事としてうまく言い表している。

一つだけ、この説明には心配なことがある。図2に示す無限ソレノイドの場合である。密に巻かれた十分長い螺旋コイル（ソレノイド）に直流電流を流すと、ソレノイドの内側には軸方向に磁界が存在するが、外側は電界も磁界もない環境になる。供給電流を徐々に増やしてゆくとソレノイド内の磁界は電流に比例して強くなるが、ソレノイドの外側の磁界は相変わらず0である。この状態で、ソレノイドを取り囲むように導線ループを置くと、ループ面内の磁束密度は変化しているので、(1)により、ループには電磁誘導による起電力が発生する。でも、導線の場所での磁界が0と言うことは、磁力線がない。切りたくても磁力線がないのでは切りようもなく、起電力生成の説明ができない。

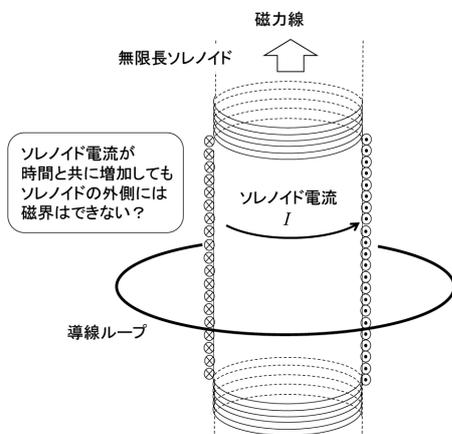


図2 無限長ソレノイドの外側の導線ループに起きる電磁誘導（電流  $I$  が時間とともに増加する場合）

ファラデーならこう答えるであろう。ソレノイドの電流が増えてゆくに従い、それに比例してソレノイドの中の磁力線の数が増えてゆく。では、その増えてゆく磁力線はどこから生まれているか。磁力線には出発点無く、ループになっている。図3に示すように、無限の長さのソレノイドと言えども行き着く先には端があり、磁力線はそこで折り返して電流を取り囲むようにループになっているはず。電流の増加と共に、次々と増え続ける磁力線は、ソレノイドの内部では内壁から中央に向かって押し出され、空間内で均等に密度を上げてゆく。一方、ソレノイドの外側の磁力線は速いスピード（光の速度？）で無限のかなた飛び去ってしまう。しかし、その際、必ず、途中にある導線に切られ、ガリッと音が出る。このようにして、導線に生まれる起電力を感知することができる。ソレノイドの中に増えてゆく磁力線の数を決まっているので、音の数はループの大きさや形に因らない。ソレノイドの外側にも動く磁力線があるのである。しかし、無限大の空間に超高速で飛び去る有限個の磁力線なのでその密度（=磁束密度）は0、磁界はないといえるのである。

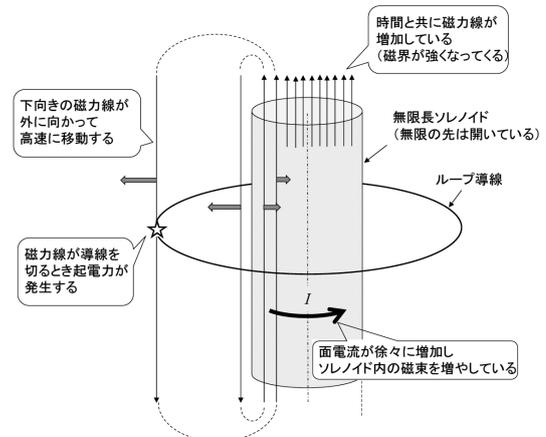


図3 図2に対するファラデー流電磁誘導の説明

このように見てくると、導線が磁力線を切るというファラデーの直感は、かなり本質的であると理解できるであろう。でも、ここに以下のような不思議なことが起きるのである。その現象：単極誘導を見てみよう。

### ☝ 単極誘導とは

電磁誘導の発見の10年前、エルステッドが電流の磁気作用を発見した翌年の1821年、ファラデーは単極誘導回転機を発明した。図4(a)に示すように、ガラス容器の床面中央に棒磁石を垂直において蠟で固定し、そこに、棒磁石の上部が見える程度に水銀を入れ、

中心軸上部から水銀に浸る程度の銅線を吊るした。この銅線は上部の点を中心に自由に動くことができるようになっており、この銅線と水銀間に電池を挟み電流を流した。そうすると、銅線が少し斜めに傾いた状態で磁石の周りを回転し始めたのである。さらに、同図(b)のように、磁石が下端を軸にして動くことができるようにし、銅線を垂直に固定した。同じように電流を流すと今度は磁石が傾いた状態で回転を始めたのである。この現象は単極誘導と呼ばれ、図4の装置は単極誘導回転機である。動作原理は、(a)が磁界中を流れる電流に働く力（ローレンツ力：フレミングの左手の法則）により、(b)は銅線に流れる電流が生み出す磁界の方向に磁石の極が吸い寄せられているからである。銅線と磁石の動きに相対関係が見てとれ、これが、これから述べる単極誘導のパラドックスの伏線になる。

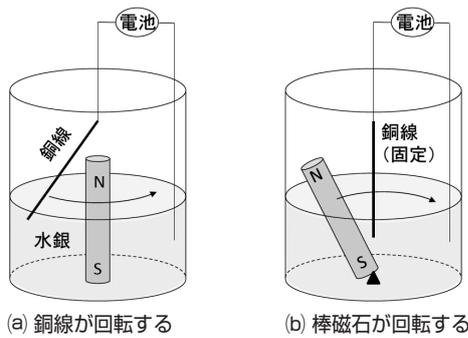


図4 ファラデーの単極誘導回転装置（イメージ図）

### ファラデーのパラドックス

図5に示す円柱状の棒磁石と導体円板が、中心軸を共通にして重ねられており、それぞれが独立に回転する機能をもつ。導体円板上に、中心と縁の間の起電力を測る検流計が回転しないように（導線が円板の縁に接触するように）取り付けられている。

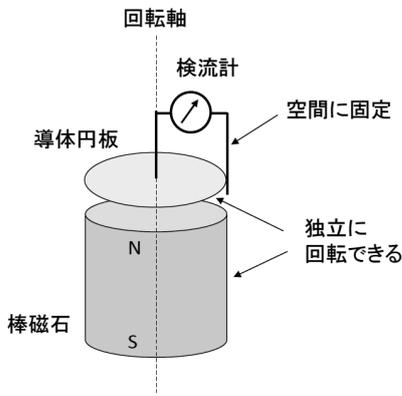


図5 単極誘導発電機

ここで、以下の4つのケースをみてみよう。

- ① 磁石も円板も静止している
- ② 磁石が静止し、円板が回転している
- ③ 磁石が回転し、円板が静止している
- ④ 磁石と円板が同速度で回転している

検流計に触れがある場合を○、振れない場合を×とするとき、上記4つのケースではどうなるであろうか。以下の答えを見る前に、ここで立ち止まって、読者の皆さん自身で予想を立ててほしい。

では、結果を。順に、×、○、×、○である。③、④の結果に、あれっと思わないだろうか。それがパラドックスと言われる所以であるが、以下、これを考えてみたい。ちなみに、図5の構成は単極誘導発電機であり、その発明は電磁誘導発見直後の1831年のことである。

### 単極誘導発電機の動作をどう考えるか

一つ一つ見てゆきたい。

- ①のケース：何も起きなくて当然であろう。
- ②のケース：円板のみが回転している。円板が回転すると、回転軸と平行に向く磁界中を円板の中の電荷が周方向に動くことになり、動く方向と磁界の方向のそれぞれに直交する方向、すなわち円板の径方向に力（ローレンツ力と呼ばれる）が働く。このローレンツ力によって自由電子が押されて動いて縁（あるいは中心）に集まり、中心と縁で電位差が生まれる。これによって、検流計の針が振れるのである。

③のケース：今度は円板が止まっていて、磁石が回転している。磁石と共に回転する人が円板を見れば、②のケースと同じで円板が回転しているように見え、故に、検流計は振れると思うだろう。図4の例で、一方を止めれば相手が回ったように。ところが、この場合については、電磁誘導起電力を、導線が磁力線を切る量に比例すると説明したあのファラデーが、「磁力線は回転しない」と答えたい。そうであれば、①と同じであり、検流計は振れない、が納得できる。でも、どうしてもと言う気持ちも残る。

④のケース：これも、磁石と円板の関係の相対性から①と同じに見え、検流計は振れ無さそう。しかし、実際は振れるわけで、不思議に感じる（故にパラドックス）。でも、③で述べたファラデーの言葉に従うならば、磁力線は回転しておらず、それなら②と同じであり、検流計は振れるのである。

## もう一押し：定説は疑ってみよう

図5の単極誘導については、回転する棒磁石の磁力線は回転しない、として説明できたのであるが、あのファラデーにはいかにも歯切れが悪く、故にパラドックスと言われてしまうわけである。開き直って、「回転する磁石の磁力線も一緒に回転する」と言ったらどうであろう。そして、「誘導起電力は導線が磁力線を切る量に比例する」を通すのである。

③のケースを考えてみよう。この場合、i) 磁石は回転している、ii) 円板は止まっている、iii) 電圧を測る回路全体も止まっている、であった。i) と ii) の相対的な関係は②と同じ。ならば、円板の中心と端を結ぶ線が磁力線を切っているのだから円板には起電力が発生している。(i) と (iii) の関係も (i) と (ii) の関係と同じなので、検流計の導線上にも円板と同電圧の起電力が生まれている。ただし、二つの起電力は電気回路としては逆向きなので打ち消されて検流計が振れない。結果は×で合っている。

④のケースでは、円板と磁石は同期して回転しているので、円板には起電力が発生しない。しかし、起電力測定のため検流計側導線は固定されていてそれが磁力線を切るのだからそこに起電力が発生する。故に、結果は○で、これも合っている。

なんと、軸中心に回転する棒磁石の磁力線は、①磁石と一緒に回転する、②回転しない、のどちらでも、単極誘導の結果を矛盾無く説明できてしまうのである。では、どちらが正しいのだろう。

④のケースで見てもよい。①が正しければ、起電力は円板上には無く、検流計回路部の導線上に生まれる。②が正しければ、起電力は円板上に発生し、検流計回路部の導線上にはない。発生場所に違いがあるのだから、そこにプローブを当てて測ってみれば良いのではと思うだろう。しかし、そのためには、測りたい部分と検流計とを導線で結んで回路（ループ）を作らなければならず測ることができるのはこのループ全体の起電力である。結局、真実が①か②かについては、少なくとも測定によっては知れ方が無い、というのが、現時点での筆者の理解である。

## マクスウェルに聞いてみよう

なにかもやもやが晴れないところで、電磁気学を数理モデルで完成させたマクスウェルに電磁誘導の法則を説明してもらおう。マクスウェルの方程式では電磁誘導の法則は、(1)式を突き詰めて得た次式で表されて

いる（ここでは、そうなんだと思って見てほしい）。

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

この式に現れているのは、場を表すベクトル量の電界  $\mathbf{E}$  と磁束密度（磁力線の密度） $\mathbf{B}$  のみである。磁力線そのものは、方程式を作り上げる過程ではイメージ作りに寄与したのに、出来上がった方程式からは消えているのである。磁束密度  $\mathbf{B}$  は磁力線の濃さなので、磁力線が動いているかどうかは関係なく、あくまでもその場所の密度なのである。そうすると、回転している棒磁石では、磁束密度（=磁場）そのものは何も変わるところがなく、回路が動かない限り空間に起電力は生まれない、と説明できる。回転する棒磁石の磁力線が回転していようがいまいがマクスウェルの方程式には関係ないこと、と言う収まりになる。では、ファラデーが唱えた「起電力は導線が磁力線を切るときに生まれる」は、電磁気学ではどう説明されるのだろうか。それには次講で取り上げるベクトルポテンシャル（=電磁界を裏で支配する場（ゲージ場と呼ばれる））の登場を待ってほしい。

## 磁力線の運動に意味があるか

電気力線と磁力線の存在やその動きを厳密に議論しようと思うと、相対論や量子論が必要になってくる。こういう議論が好きな読者の皆さんには、以下の本[1],[2]を紹介したい。

[1]は高校生の物理教育（教科書づくり）に一言をもつ江沢洋先生が1960～1980年代に書かれた記事を整理してまとめている。電磁気学と相対論を結ぶ視点から、動く磁力線・動く電気力線問題について多くの章が充てられている。力線が動くと言う考えに否定的な今井功先生からの批判に対して、熱い持論を展開している。[2]はその今井先生の本。電磁誘導の説明において、「導線が磁力線を切るとき、起電力が発生する」と言う考え方には理論的根拠がなく、捨てよと強調している。両先生（共に故人）は、青少年の物理教育のあり方に長く情熱を注がれてきた理論物理学者（大御所）であり、お二人の論争が問題点を白日に晒してくれて大変面白い。

<参考文献>

[1]江沢洋, 上條隆志(編), 相対論と電磁場(江沢洋選集II), 日本評論社, 2019.

[2]今井功, 電磁気学を考える, サイエンス社, pp. 236-251, 1990.