

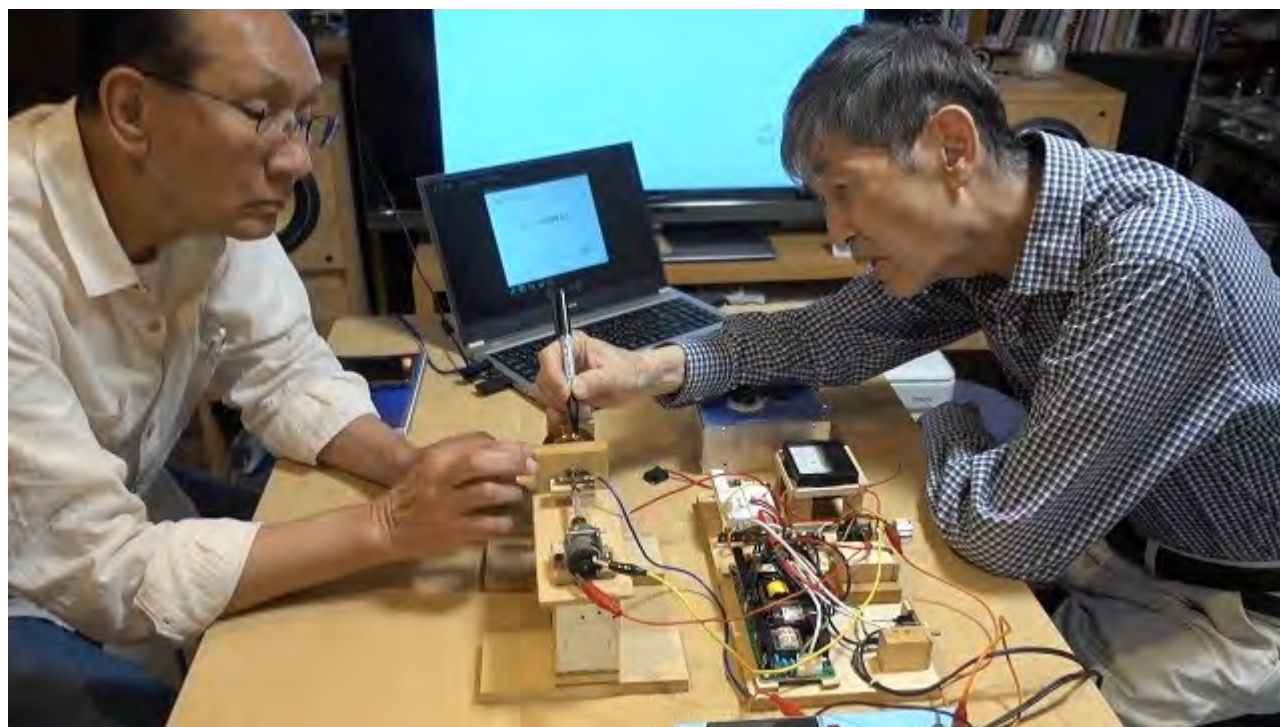
第 167 回 CIS パートナー会議事録(一般様用) 260616 修正

開催日時 2022 年 5 月 31 日 (日) 13 時 ～

講 師 西村 靖紀 様

テーマ 「ファラデー単極誘導の実験」

実験開催 CIS 事務所



会議風景

第167回 CISパートナー会議

西村さんの「プレゼンテーション資料」パワーポイント

ファラデー 単極誘導 実験

5月31日
西村 靖紀

ファラデー・ディスク

ファラデーの単極誘導とは

ファラデーは1831年に電磁誘導を発見し、後の「ファラデーの電磁誘導の法則」につながった。電磁誘導の研究を進める一方で「瞬間的ではなく連続した電流を取り出す方法を模索した結果同年、銅円板を磁場中で回転させる単極発電機「ファラデー・ディスク」発明した。磁場中を導体(円板)が回転することで、その中心と縁の間に起電力が生じ、連続的な電流がえられる。これが単極誘導の最初の実証である。

「ファラデーの電磁誘導の法則」は、「磁束の時間変化が起電力を生む」という形で纏められたが、単極誘導では磁束の変化がないように見えるのに起電力が生じるという「ファラデーのパラドックス」が現れる。

これは、磁場が変化しなくても導体が磁場中を動けばローレンツ力が電荷を押し出し、起電力が生じるという視点で理解され、後にマクスウェルの電磁場理論で統一的に説明されることになる。

ファラデー・ディスク



単極誘導の原理と起電力の導出

単極誘導とは、磁場中で導体が回転すると、導体内部の自由電子がローレンツ力を受けて一方向に押しやられ、起電力が生じる現象。

磁場 B の中で導体が速度 v で動くと、電子はローレンツ力 $F=q(v \times B)$ を受ける。

図のような回転円板を考える半径 R の金属円板

円板上の半径 r の位置にある電子の速度は $v=\omega r$

電子はローレンツ力により半径方向に押し出されるため、中心が正、外周が負の電荷分布が生じ、中心と外周の間に起電力が生まれる。

微小部分での誘導起電力 dE

長さ dr の導体が速度 v で磁場 B を横切るときの微小起電力は $dE=Bv dr$

ここで $v=\omega r$ なので $dE=B(\omega r)dr$

円板全体(中心→外周)で積分

$$E = \int_0^A B \omega r dr = \frac{1}{2} B \omega A^2 \quad \text{----- 単極誘導起電力}$$

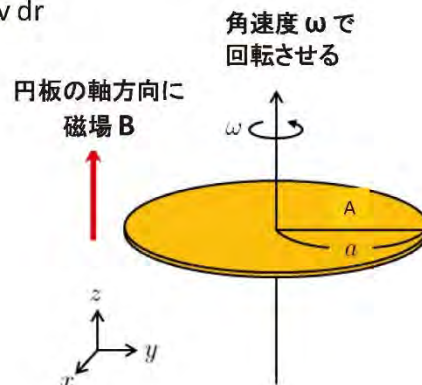
実験機の単極誘導起電力 E の算出

$$E = 0.5 \times 0.80 \times 20\pi \times 0.0175 \times 0.0175 \\ = 7.7 \text{ mV}$$

$$B = 0.80 \text{ T (テスラ)}$$

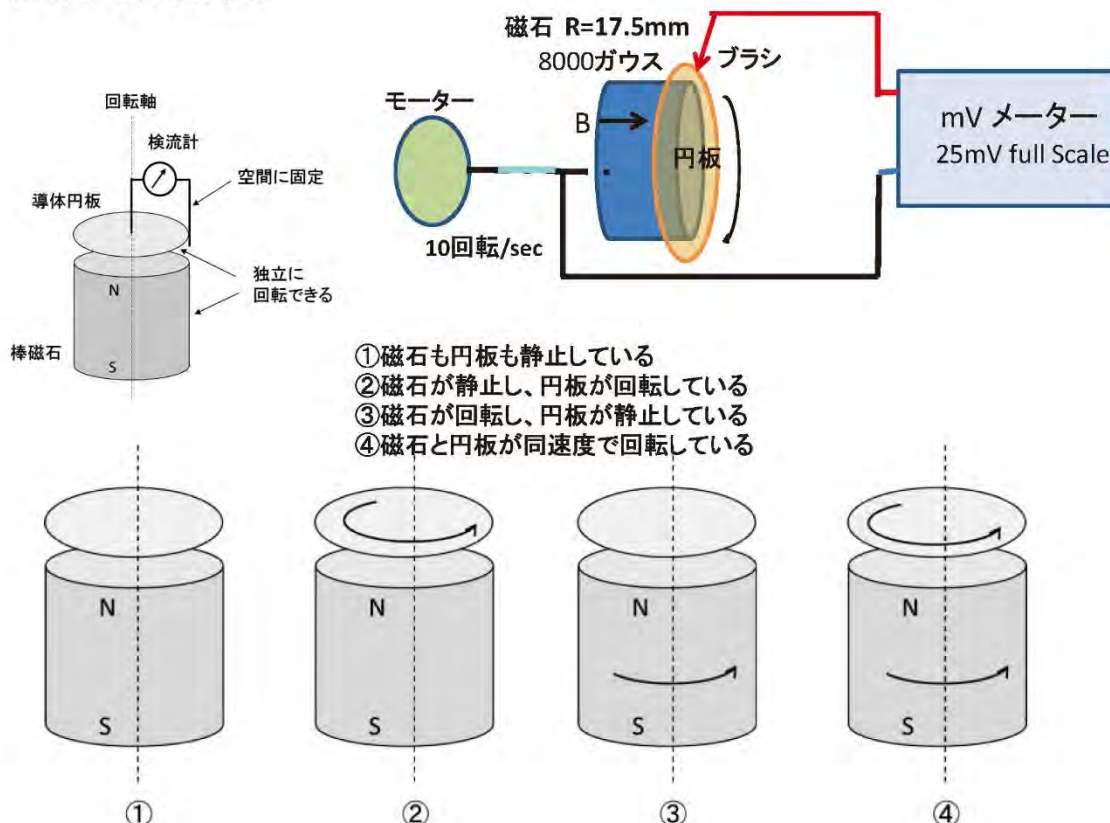
$$A = 17.5 \text{ mm} = 0.0175 \text{ m}$$

$$\omega = 10 \text{ rps} = 20\pi \text{ rad/s.}$$

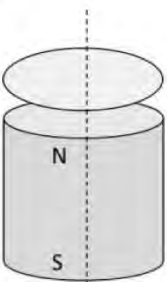
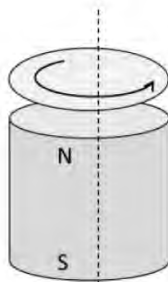
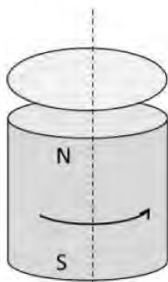
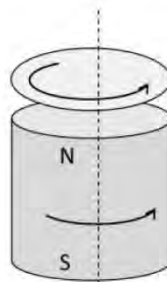


単極誘導の再現実験

単極誘導 起電力実験ダイアグラム



起電力の測定

					
	①	②	③	④	
磁石	静止	静止	回転	回転	一体で回転
円板	静止	回転	静止	回転	
起電力	0 mV	7.2mV	0 mV	7.1mV	

ファラデーのパラドックス

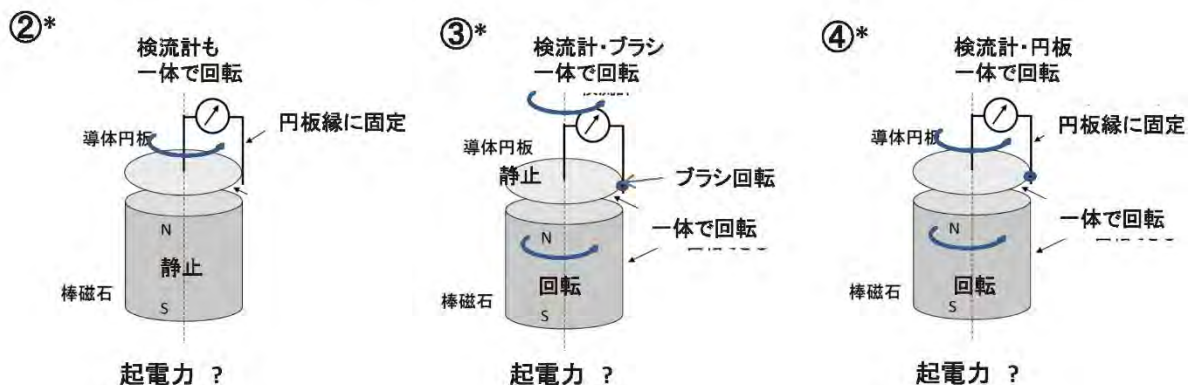
- (1) なぜ ② 磁石を固定して円盤を回せば起電力が生じるのに、③ 円盤を固定して磁石を回しても起電力が生じないのか？
- (2) なぜ ④ 磁石を円盤と一緒に回転させても、静止した回路には起電力が生じるのか。これが単極誘導の最も面白い(そして混乱しやすい)点。
- (3) なぜ ④ 銅円板と磁石とを合体させて、円板の中心と円周部にで圧を印加して電流を流すと合体したまま回転するのか、どこに対してトルクが発生しているのか？力学的反作用が見当たらない

② ③ ④ の結果の解釈 議論

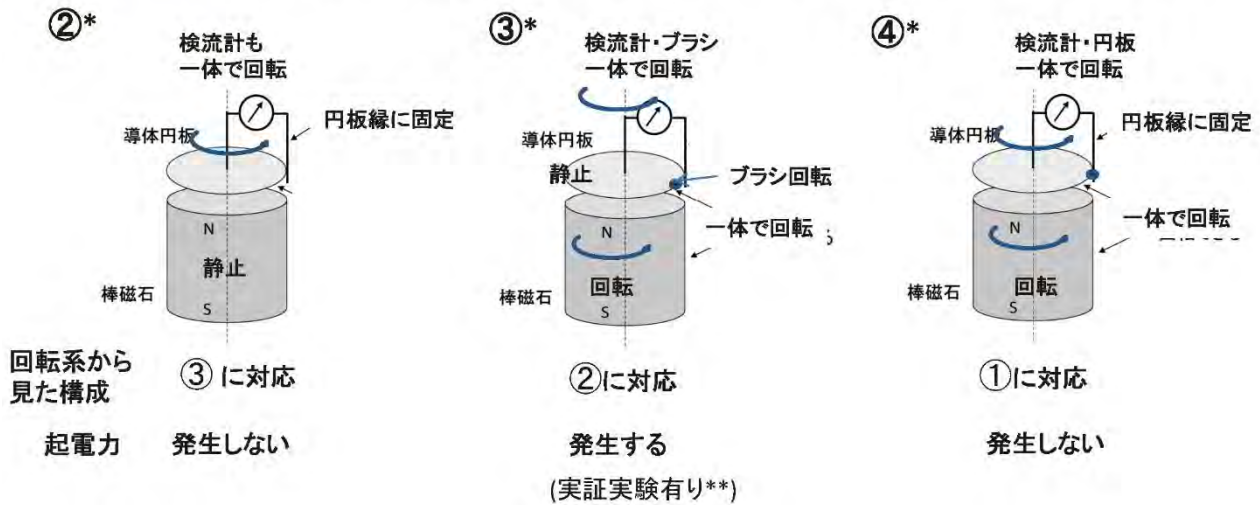
- (1) 磁石の回転有無にかかわらず、円板が回転している場合のみ起電力が発生している
→ ローレンツ力は円板内の荷電粒子(自由電子)が動くことにより働く====短絡的か
- (2) 磁石が回転しても磁束の分布は静止しているのか、回転しているのか
- (3) マックスウェルの方程式から単極誘導を導き出したら、ファラデーのパラドックスを矛盾なく説明できるか
- (4) 相対論的電磁気学から単極誘導を導き出したら、説明できるか

等々

思考実験 以下のような構成での単極誘導実験を考える



観測者を回転系に立って見た構成を考える (観測者から見れば相対的に静止系と回転系が逆になる)



④* 電流の閉回路がすべて回転体の中に閉じており、その回路の各部分に働くローレンツ力のモーメントが、回転体内部で打ち消し合うため起電力は発生しない

**単極誘導(ファラデーのパラドックス)ー3
<https://www.youtube.com/watch?v=GQP9f4Imtrk>

単極モーター回転確認実験

単極誘導モーターは、右図の回路に
 $V+ \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow V-$ と電流 I を流すと、Z軸を
磁石円板(一体)が角速度 ω で回転する。

$I = 9A$ で回転する 回転数 5~15 回転/sec

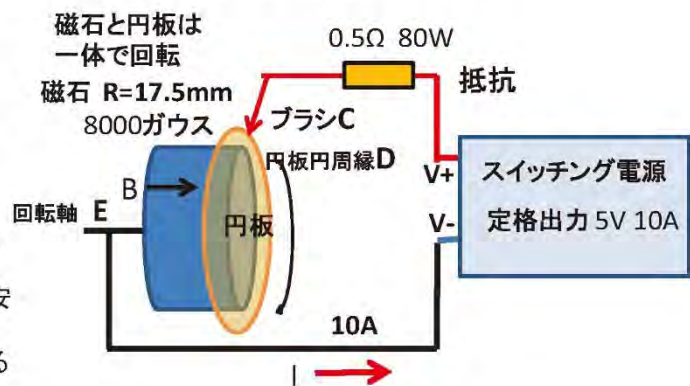
ブラシ電極(細線をブラシ状に束ねたもの)の場合は
接触点が多数あるので時間的に接触が安定になり比較
的に安定に回転する
接触点が一か所の金属電極では、時間的に接触が不安
定で回転が安定しない。
給電はブラシ電極は手で円板に当てがって行っている
が、回転開始ではブラシ電極の細線が反動を受けて
弾かれることが感触でわかった。

単極誘導モーターの実験で理解できるが、投入する電力のほとんどは発熱と放電により消費され、
生じる回転トルクはわずかである。

単極モーターはなぜ回転するのか

ファラデーの単極モーターの場合、磁石と銅円板を合体させて、円板の中心と外周縁の間に電流を流すと、
円板と磁石が合体したまま回転する。単極モーターの不思議なところは、磁石と円板が一体となっているので、
通常のモーターでは必ず必要なステーターに相当するところが無い。磁石と円板との間の作用・反作用で
回転する訳ではない。どこに対してトルクが発生しているのか？
力学的反作用の相手がいない。では何故回転するのか？

単極モーター回転実験ダイアグラム

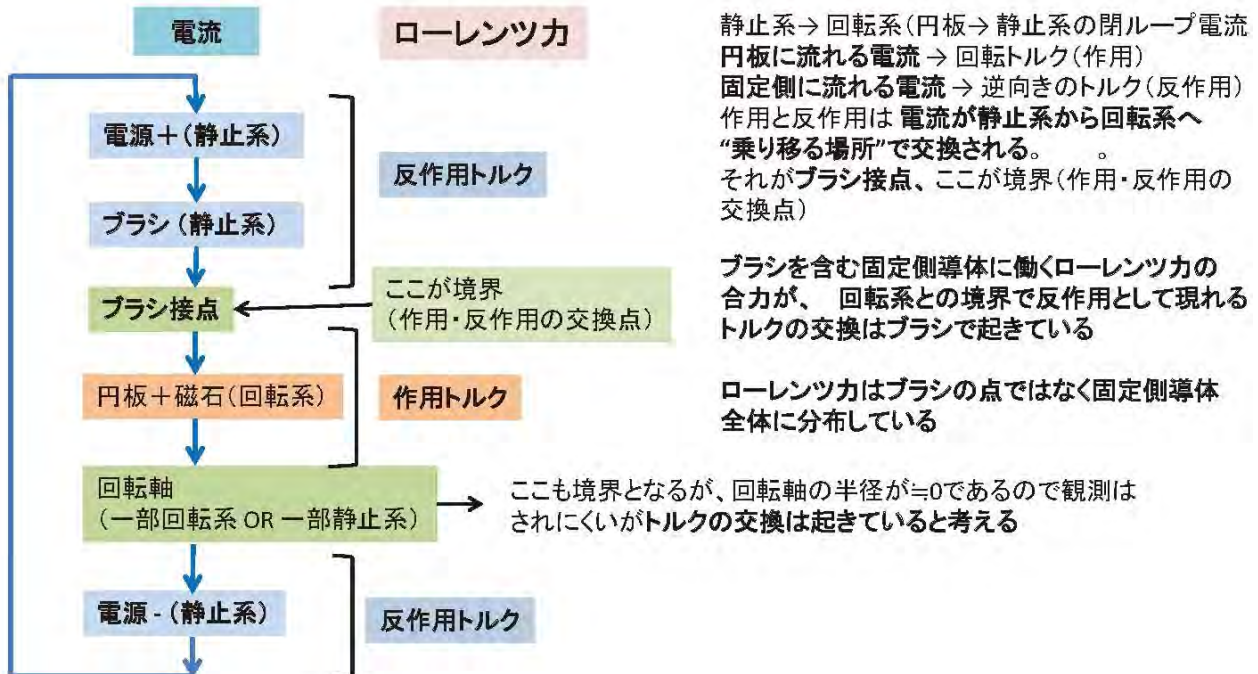


単極モーターの作用・反作用トルクはどこで生じているのか

仮説を立てた

外部の固定回路(ブラシ・配線・電源)を静止系、一体で回転する円板と磁石を運動系としてトルクは静止系と運動系の接点(ブラシ)で発生する

この仮説は概ね正しいが、詳しい解釈は以下ようになる



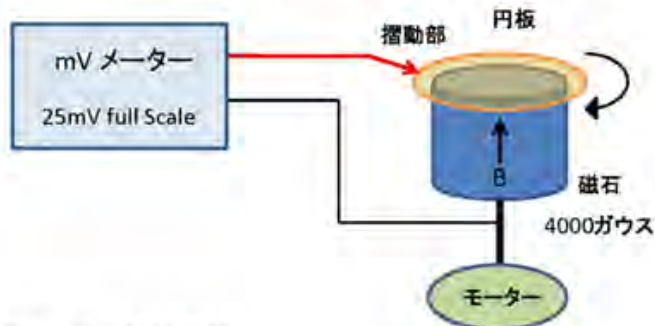
なぜ円板に働くローレンツ力と逆向きの力が外部回路に働くのか？ (なぜ作用反作用になるのか？)

電磁場そのものが“力のやり取り”を閉回路で完結させる構造になっているため
電流は閉回路を作るので、ローレンツ力も閉回路を作る。
電磁場は回路の一部にだけ力を与えることはできず、必ず回路全体で作用反作用の
ペアを作る。

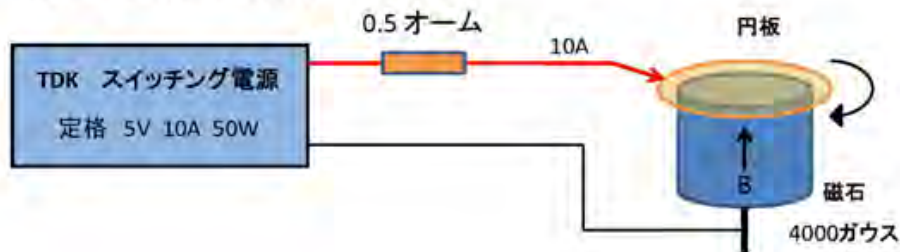
- ① ローレンツ力は 電流 × 磁場 の局所的な力
ローレンツ力は電流が流れている部分すべてが力を受ける。
- ② 電流は必ず閉回路 力も回路全体に分布する。
- ③ 電磁場は「力の片側だけ」を作れない
電磁場は、ある部分に力を与えたら、必ず別の部分に反対向きの力を与えると
いう性質を持つ。これは電磁場の運動量保存則から導かれる。
電磁場は運動量を持つ
電磁場の運動量はポインティングベクトルで表される：
電磁場が物体に力を与えるとき、電磁場自身の運動量が変化する。
その変化は必ず「別の場所」に反作用として現れる。
- ④ 結果：円板と外部回路に作用反作用が生じる
円板にローレンツ力が働くと、電磁場の運動量が変化する。
その変化を補うために、外部回路に逆向きの力が働く。
これは電磁場の運動量保存則が要求する。

単極誘導実験ダイグラム

(1)単極誘導 起電力 確認実験



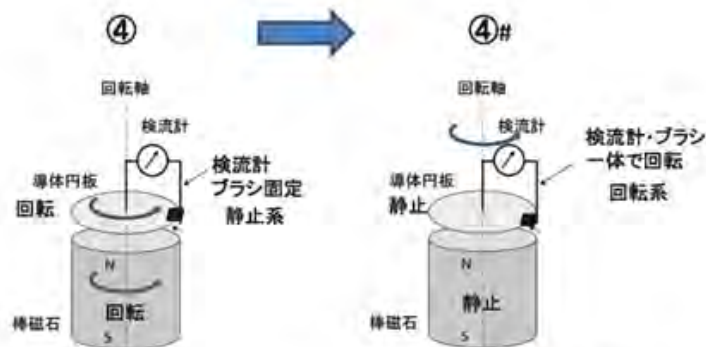
(2)単極モーター回転実験



資料追加

④において、観測者が回転系に立って見た構成→④#

(観測者から見れば相対的に静止系と回転系が逆になる)



④*は円板/磁石・ブラシ、検流計の測定回路全てが回転しているため、観測者が回転系に立って見た場合相対的に静止系と回転系が逆にした①と同等になり起電力は発生しない

観測者が静止している円板/磁石にいる場合、ブラシ・検流計の測定回路は回転している

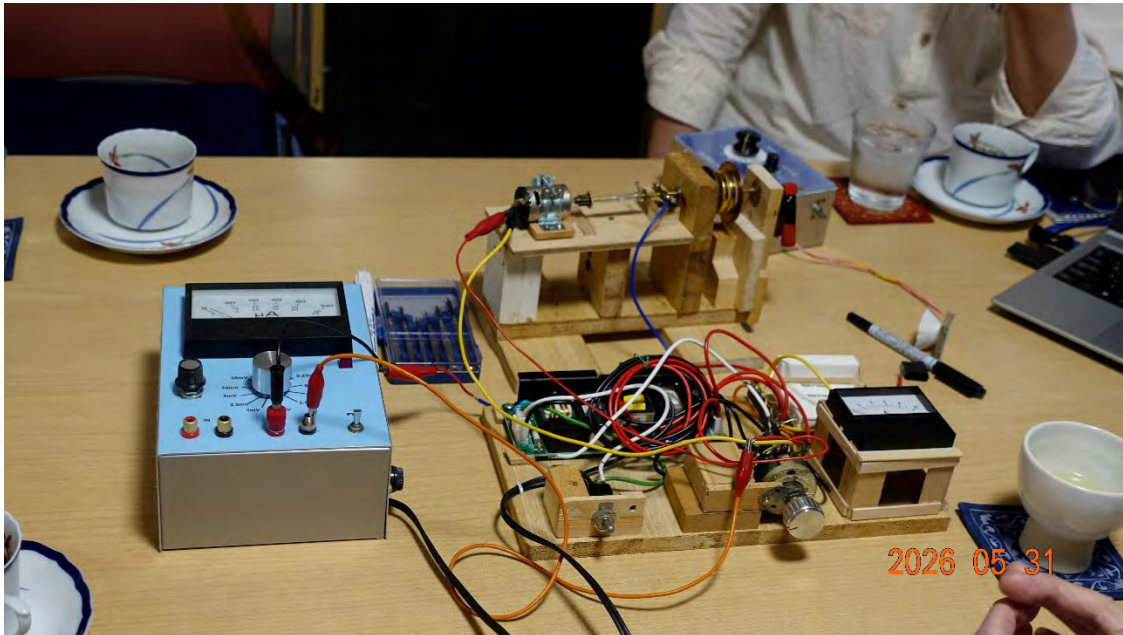
静止している磁場の中で、ブラシ・検流計の測定回路が回転しているので、ローレンツ力が働き起電力が発生する

実験結果と考察

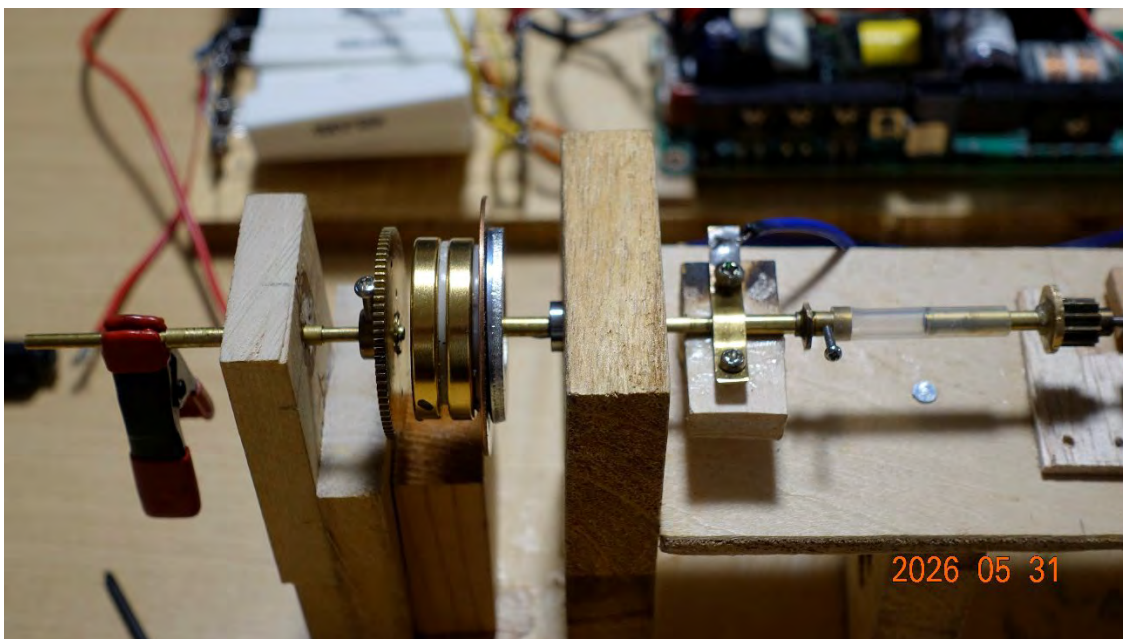
西村さんの「実験結果と考察」資料

1 単極誘導・起電力の測定

実験器具全貌_DSC8379.JPG



単極モータ_DSC8390.JPG



起電力 V は、ブラシと回転軸の間の電圧を mV 計で測定

(1) ② 磁石が静止、円板が回転 ----起電力 V の測定

4_2 番の実験-磁石固定.mp4

ブラシと円板の接触が良好な時は、回転数 $\sim 600\text{RPM}$ $V = 8 \sim 9 \text{ mV}$

ブラシと円板の接触が不十分な時は、 $V = 4 \sim 6 \text{ mV}$

(2) ④ 磁石と円板が一体で回転----起電力の測定

5_4 番の実験_円盤と磁石回転_C0007.MP4

ブラシと円板の接触が良好な時は、回転数 $\sim 600\text{RPM}$ $V = 7 \text{ mV}$

ブラシと円板の接触が不十分な時は、 $V = \sim 5 \text{ mV}$

磁石/円板を逆回転させた時は(接触が良好) $V = -6 \text{ mV}$

逆回転で起電力が極性がかわる

(1) (2) ととも起電力実測値は、理論計算値と近い値となった。

(3) ③ 磁石が回転、円板が静止----起電力の測定

7_3 番の実_磁石回転_円盤静止_IMG_7814.MOV (この動画は測定前の状況)

磁石回転数 $\sim 600\text{RPM}$ 起電力 $V = 0 \text{ mV}$ を確認した。

円板が静止していれば、起電力は発生しない。

以上で、ファラデー単極誘導 磁石/円板、静止/回転の組み合わせ 3 件について起電力の発生の有無(ファラデー・パラドックス)の確認ができた。

2 思考実験

以下のような構成での単極誘導実験を考える。 5 ページ図を参照

②* ③* ④*

これら構成を観測者を回転系に立って見た構成を考える

(観測者から見れば相対的に静止系と回転系が逆になる)

回転系から見た構成では以下の対応となる。

②* $\rightarrow$ ③ 起電力発生しない

③* $\rightarrow$ ② 起電力発生する

④* $\rightarrow$ ① 起電力発生しない、

④*は④の相対的対称とはなっておらず、④の完全な相対的対称構成は④# となる

④# $\rightarrow$ ④ 起電力発生する (追加説明資料参照)

これら②*、 ③*、 ④*、 ④# 構成での起電力発生有無の確証は、先人たちの実証実験や、論文によりすでに行われている。

3 考察・議論

- (1) 磁石の回転有無にかかわらず、円板が回転している場合のみ起電力が発生している
→ローレンツ力は円板内の荷電粒子(自由電子)が動く」ことにより働くため-----正しい
- (2) 磁石が回転しても磁束(磁力線)の分布は静止しているのか、回転しているのか
→磁力線が静止しているか、回転しているかわからないが
磁力線が静止していても、回転していても単極誘導の説明はできる。
- (3) 観測者を静止系に立たせるか、回転系に立たせるかにより、相対的運動と電磁気の
関係を考えれば、ファラデー・パラドックスは説明できるのでは
- (4) 測定回路(閉ループ)が静止系・回転系両方にまたがっている存在している場合は、
磁場中をこの閉ループが動けば起電力が発生する。
測定回路(閉ループ)が静止系・回転系どちらか片方にのみ存在している場合は、
磁場中をこの閉ループが動いても起電力は発生しない。測定回路(閉ループ)の
各部分に働くローレンツ力は系内部で打ち消し合うので起電力は発生しない。

ファラデー単極誘導に関して、以上のような解釈・理解が得られたと考える。

2 単極モーターの実験

(1) 単極モーターの回転の確認

磁石と銅円板を合体させて、円板の中心と外周縁の間に電流を流すと、円板と磁石が
合体したまま回転する。これを確認する。

6_単極モーターC0010.MP4

ブラシ電極と回転軸に電圧を印加し、単極誘導モーターの回路に電流 I を流すと、
磁石円板(一体) 回転する。

ブラシ電極の円板との接触が安定になれば

$I = 8A$ 回転を始める。

$I = 9A$ 安定に回転する 回転数 450~600 RPM を確認した。

ブラシ電極の接触がさらによくなったか、回転数 700 RPM まで上昇した時もあった。

ブラシ電極(細線をブラシ状に束ねたものは、接触点が多数あるので時間的に接触
が安定になり比較的その回転する。接触点が 1 カ所の金属電極では、時間的に
接触が不安定で回転が安定しない。給電はブラシ電極は手で円板に当てがって
行っているが、回転開始ではブラシ電極の細線が反動を受けて微かに弾かれること
が感触でわかった。

(2) 考察・議論

単極モータはなぜ回転するのか

ファラデーの単極モータの場合、磁石と銅円板を合体させて、円板の中心と外周縁の間に電流を流すと、円板と磁石が合体したまま回転する。単極モータの不思議なところは、磁石と円板が一体となっているので、通常のモータでは必ず必要なステーターに相当するところが無い。磁石と円板との間の作用・反作用回転する訳ではない。どこに対してトルクが発生しているのか？力学的反作用の相手がいない。では何故回転するのか？

AI に質問した

外部の固定回路（ブラシ・配線・電源）を静止系、一体で回転する円板と磁石を運動系としてトルクは静止系と運動系の接点（ブラシ）で発生しているとかがえられるか

AI の回答は

「この理解は本質的に正しい」

ただし、より厳密に言うと “ブラシ接点そのもの” でトルクが発生しているのではなく、ブラシを含む“固定側電流経路”にローレンツ力が働き、その力の作用点がブラシ付近に集中して見える という構造になっている

以下、順を追って説明する

単極モーターの電流経路（閉回路）

電源 + → ブラシ → ブラシ接点 → 導体円板（回転子） → 中心軸 → 電源 -
——— 静止系 —————→ | ←————— 回転系 —————→ | ←— 静止系 ———

電流が流れている導体すべてにローレンツ力が働く

回転系 円板に流れる電流 → 回転方向のローレンツ力 → 円板にトルク（作用）

静止系 外部回路（ブラシ、配線、電源）に流れる電流 → 外部回路に逆向きのトルク（反作用）

円板に生じる回転トルクの反作用は、電流の閉回路を構成する「固定側の導体（ブラシ・配線・電源）」が受け取る。

作用と反作用は 電流が回転系から静止系へ“乗り移る場所”で交換される。

ブラシを含む固定側導体に働くローレンツ力の合力が、 回転系との境界で反作用として現れる
→→→→AI の回答

なぜ円板に働くローレンツ力と逆向きの力が外部回路に働くのか？

AI の回答

電磁場そのものが“力のやり取り”を閉回路で完結させる構造になっているため

電流は閉回路を作るので、ローレンツ力も閉回路を作る。

電磁場は回路の一部にだけ力を与えることはできず、必ず回路全体で作用反作用の

ペアを作る。

電磁場は「力の片側だけ」を作れない。電磁場は、ある部分に力を与えたら、必ず別の部分に反対向きの力を与えるという性質を持つ。これは電磁場の運動量保存則から導かれる。

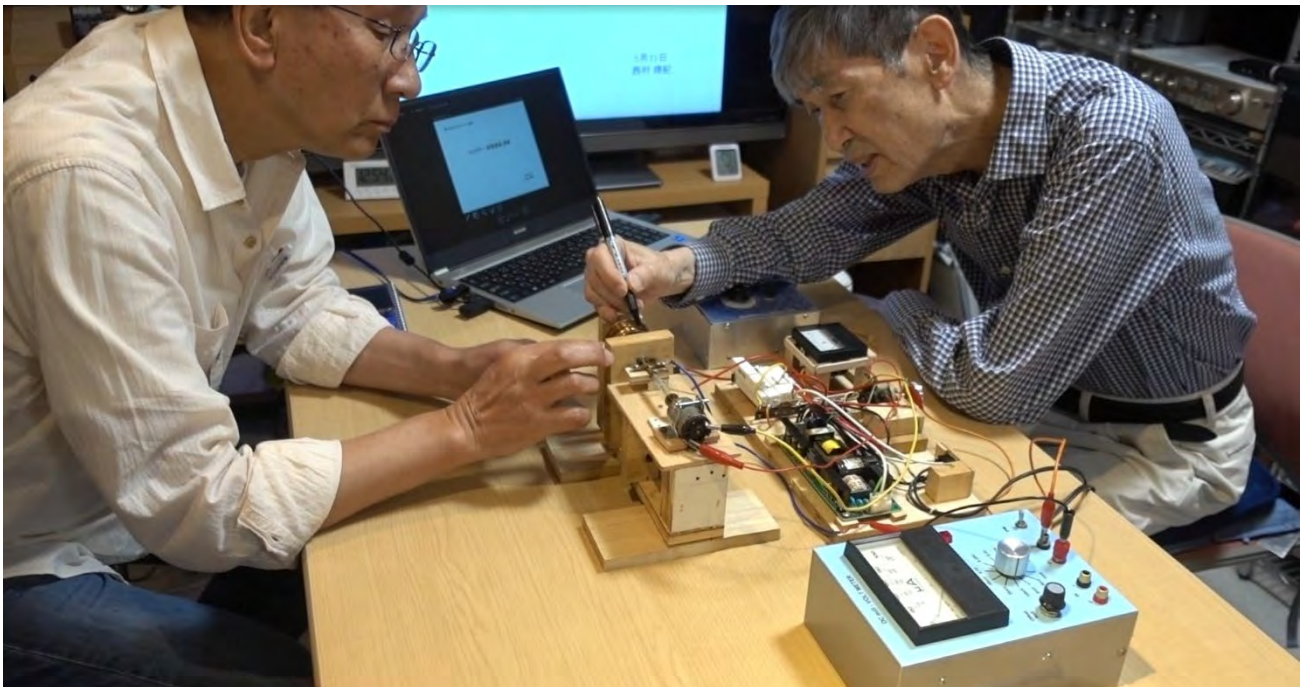
電磁場が物体に力を与えると、電磁場自身の運動量が変化する。

その変化は必ず「別の場所」に反作用として現れる。

AI の回答は正しいと思う (正否の判断は乏しい電磁気学の知識では無理)。

以上、ファラデー単極誘導の一応の理解(まだすっきりしないところもあるが、)はできたものとする。

以上 西村さんの と「実験結果と考察」 資料



実験資材の点検

今後の日程

第168回 6月28日(日)13時～寺川雅嗣様

第169回 7月26日(日)13時～ 神田 忠起 様

第170回 8月23日(日)13時～ 山本 洋一

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

以上

2026-6-16 文責 山本洋一