

渦電流ではなく左手の法則でいこう

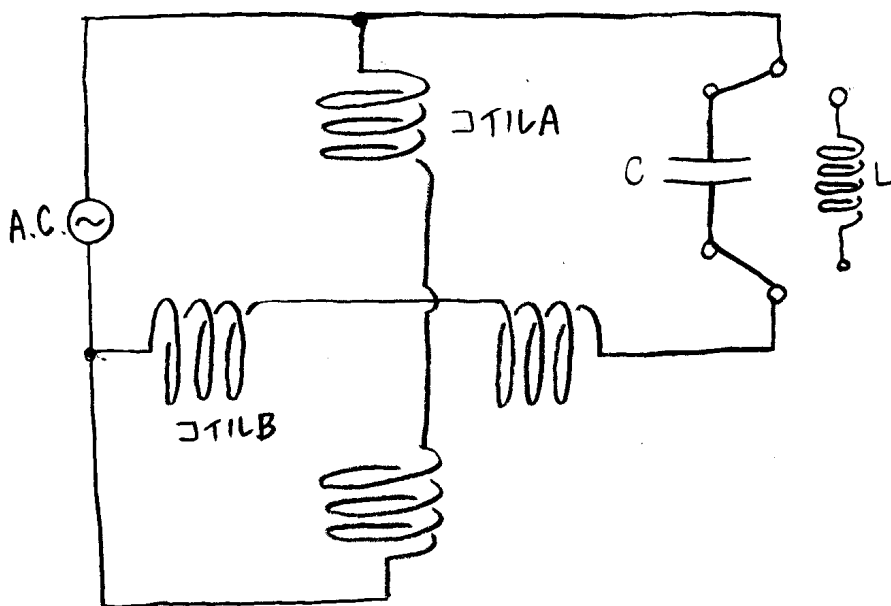
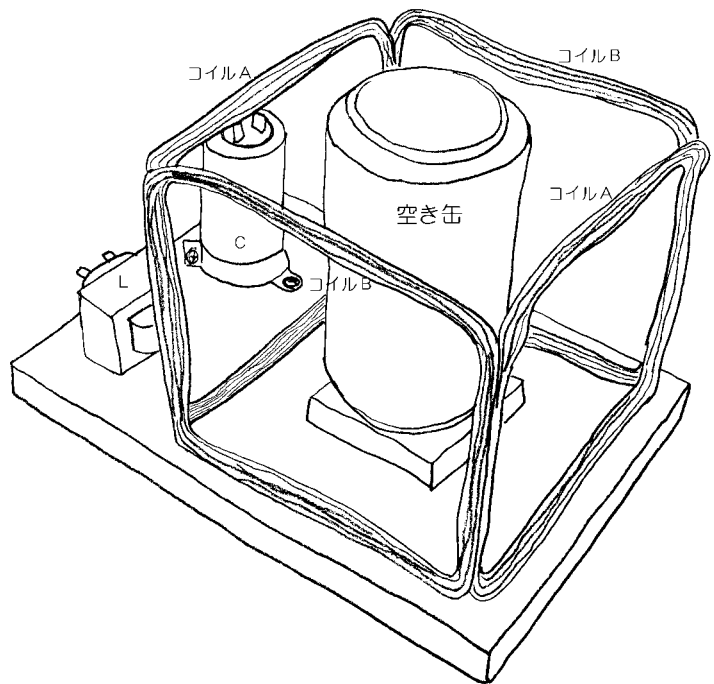
村田憲治@山県高校

誘導モーターの原理を示す装置を作って空き缶をぐるぐる回して遊んでいるうちに、いろいろ疑問がわいてきて、空き缶が回転する理由を”うず電流”で説明するより、”フレミングの左手の法則”で説明する方が教育的な気がしてきたのですが、どんなものでしょう。

コンデンサを使って位相のズレを作り，磁場を回転させる

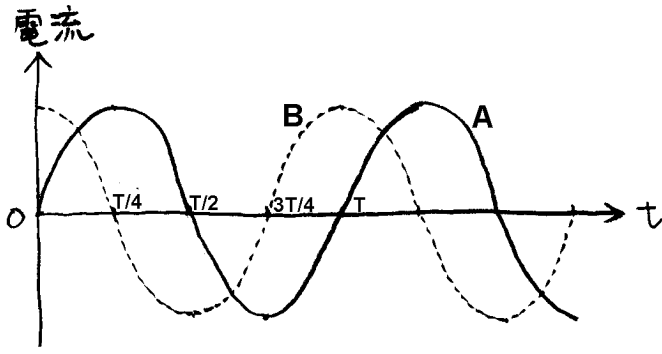
この装置は2組のコイルからできていて、いずれのコイルも0.4mmのエナメル線を100回巻いたものをつないで(つまり、あわせて200回巻)ヘルムホルツコイルのような構造になっています。

コイルAは交流電源(15~20V)にそのまま接続し、コイルBには220 μ Fのコンデンサを直列に入れて交流電源に接続します。コイルA、Bが作る磁場が直交するよう図のように組み立てます。



コイルAに流れる電流を
 $I_A = I_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$ (実線のグラフ) とすると、コイルBに流れる電流はコンデンサのおかげで位相が $\frac{\pi}{2}$ だけ進んでいて

$$I_B = I_0 \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \frac{\pi}{2} \right)$$

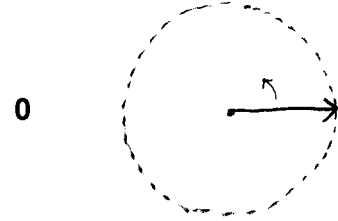


$$= I_0 \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (\text{破線のグラフ})$$

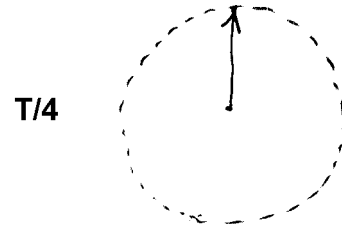
となります。電流の最大値はどちらも I_0 であることにしておきます。

磁場が回転する理由をグラフを見ながら図を使って簡単に説明してみましょう。

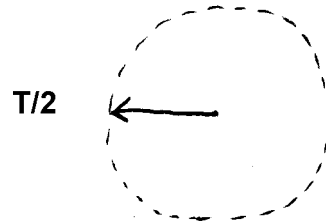
時刻 0 で A が作る磁場 H_A は 0,
B が作る磁場 H_B は $+H_0$ (最大値)



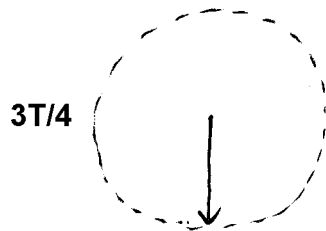
時刻 $\frac{1}{4}T$ で H_A は $+H_0$, H_B は 0



時刻 $\frac{1}{2}T$ で H_A は 0, H_B は $-H_0$

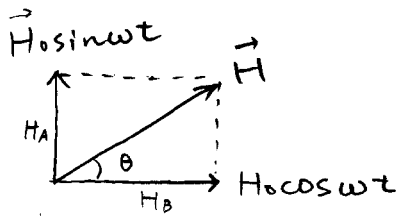


時刻 $\frac{3}{4}T$ で H_A は $-H_0$, H_B は 0



おおざっぱな説明ですが、周期 T で磁場が 1 回転しそうだということが高校生にも分かってもらえると思います。でもせっかくだから少しだけ数式を使ってみましょう。

コイル A, B が作る磁場はそれぞれ $H_A = H_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$, $H_B = H_0 \cos \frac{2\pi}{T} t$ で、合成磁場は $\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_B$ ということになりますが、 \vec{H}_A と \vec{H}_B は直交しているので図を描くと次のようになります。



図の角度 θ は、 $\tan \theta = \frac{H_0 \sin \frac{2\pi}{T} t}{H_0 \cos \frac{2\pi}{T} t} = \tan \frac{2\pi}{T} t$ ですから $\theta = \frac{2\pi}{T} t$,

つまり合成磁場は周期 T で回転することが分かります。

岐阜だと交流電源の周波数が 60Hz ですから、1 秒間に 60 回転することになります。ためにこの装置の真ん中に方位磁針を入れてみると、磁針がすごい勢いでぐるぐる回りました。

(<http://www.straycats.net/html/news195.html> に動画があります)

また、コイル B の回路にコンデンサの代わりにコイル(小型の電源トランスなど)を入れると、

今度は位相が $\frac{\pi}{2}$ 遅れますから、磁場は逆方向に回転します。これも方位磁針で確かめられます。

スチール缶の方が強いトルクを受ける理由は？

このコイルの中に空き缶を入れて回転させてみましょう。静電気の実験でよく使う「帯電棒支持台」の針の上に、逆さまにした空き缶をそっと乗せてやるとうまくいきます。すると空き缶も磁場の回転方向に回り始め、どんどん加速していきます。これが誘導モーターです。

ところでアルミ缶とスチール缶ではどちらが強いトルクを受けるとおもいますか？ 僕はアルミ缶の方が抵抗率が小さいから大きな電流が流れて磁場から強いトルクを受けると思ったのですが、結果は逆で、スチール缶の方が断然加速がいいのです。スチール缶が磁化して、方位磁針のように「振り回されて」いるのでしょうか？

サークル例会では「残留磁化が十分大きければそうかもしれないけど、そうではなくてこのスチール缶(コカコーラ)の方がアルミ缶(日本茶)より肉厚で電気抵抗が小さいんじゃないか？」という指摘を受けました。鉄の抵抗率はアルミニウムの 3~5 倍あるみたいですがスチール缶がそれほど分厚いとは思えないので、ちょっと違うんじゃないかなあ。きちんと定量的な実験をする必要がありそうです。

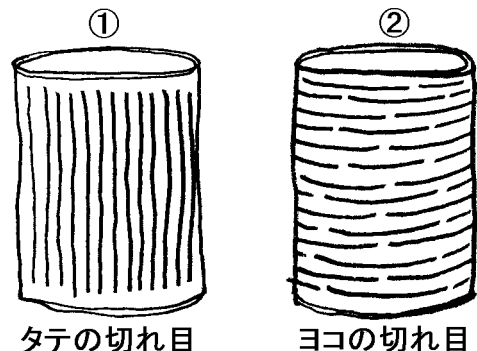
切れ目の入った空き缶は回転するでしょうか

さて、本題はここからです。

図のような「切れ目」のあるアルミ缶①、②を用意しました。切れ目のない普通のアルミ缶のように回転するでしょうか。

予想 ア どちらもよく回転する

イ はよく回転するが、 はほとんど回転



しない。

ウ はほとんど回転しないが， はよく回転する。

エ どちらもほとんど回転しない

例会で出題してみたところ，

「こんなに切れ目が入っていると渦電流ができないだろ。僕の予想はエ」

「こういうふうに缶の裏側まで回って渦電流が流れるんじゃないか？ 僕はイだね」

「いや， アかもしれないぞ。そもそも渦電流の大きさ(半径)ってどれくらいなんだ」

など結構予想は分かります。

実験してみると，結果はイで，ヨコの切れ目の入った空き缶はほとんど回転しませんが，タテの切れ目の入った空き缶は切れ目のない空き缶と同じくらいよく回転します。

これはどうやって説明したらいいのでしょうか。教科書を見てみると渦電流については次のように書かれていることが多いようです。

▶ **うず電流** ◀ 導体の近くで磁石を動かすと，レンツの法則により，磁束の変化を妨げるような向きの電流が導体に誘起される。図 58 のように，磁石のN極を導体(たとえばアルミニウム)の円板の上から近づけて，円周に沿って回転させると，磁石の前方には，うず巻き状の電流が円板

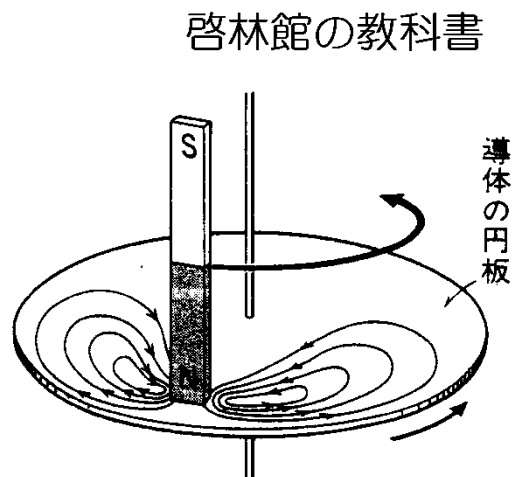


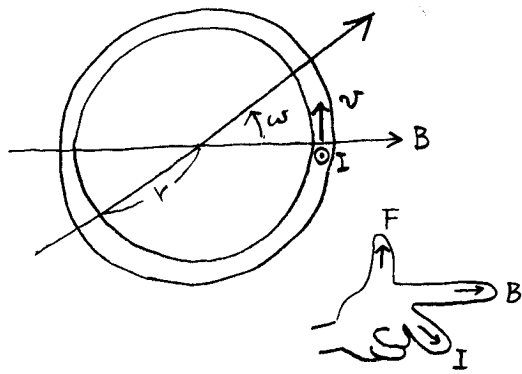
図 58 うず電流

上面にN極を生ずるような向きに流れる。磁石の後方には，反対向きのうず巻き状の電流が生じる。これらの電流をうず電流とよぶ。うず電流のため，円板は磁石について回転する。

つまりレンツの法則で電流が流れ，この図で言うと磁石(N極)の前方にN極が生まれて導体は逃げていき，後ろ側にはS極が生まれて磁石を追いかけてくる，というわけです。

こういう理解で先ほどの問題を考えると「どちらも回転しない」になりそうですし，「渦電流の半径はどれくらいなのか」が気になってくるのです。もう少しうまい説明はないものでしょうか。

こう考えたらどうでしょう。この装置では磁場が運動していますから，誘導電場ができています。磁場を \vec{B} ，磁場の移動速度を \vec{v} (大きさは $r\omega$) とすると，誘導電場 \vec{E} は $\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$

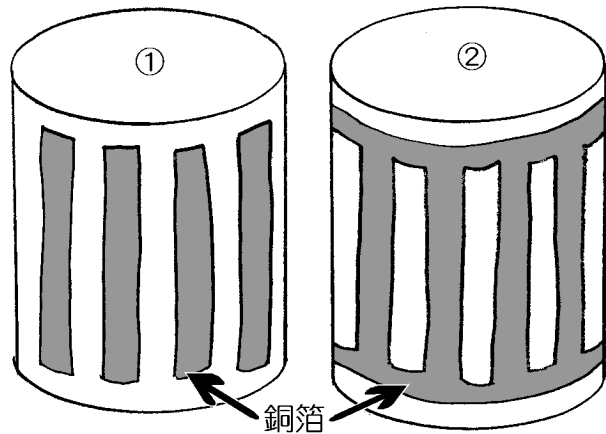


なので、左図で紙面の裏から表の向きに誘導電場ができています。もちろん誘導電流もこの向きに流れますから、フレミングの左手の法則でこの電流は磁場の移動方向と同じ方向に力を受けますこととなります。

ただし、誘導電場ができて電流が流れなければ磁場から力を受けることができません。

ペットボトルに銅箔を貼って右図のようなもの(②のヨコに貼ってある銅箔は磁場の外に出ている必要がある)を作ってこの装置の中に入れてみると、②は回転しますが①は回転しません。①では導体中の電子が流れていく先がない(下の方に電子が集まるだけ)からです。

これと同様にアラゴーの円板も、渦電流ではなく、左手の法則を使って説明した方が良さそうな気がするのですが、いかがでしょうか。



murata@straycats.net

<http://physics.omosiro.com/>