

強者の戦略

2026 年度 京大物理 第 2 問 [問題編]

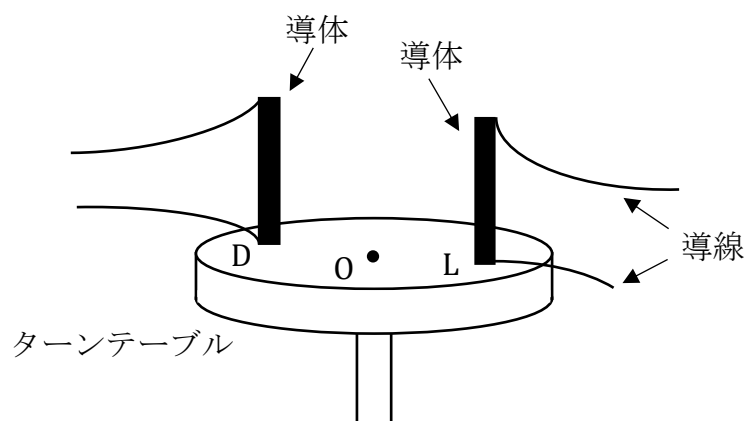
今回は 2026 年度の京大の第 2 問を解説したいと思います。ぜひチャレンジしてみてください。

物理問題 II

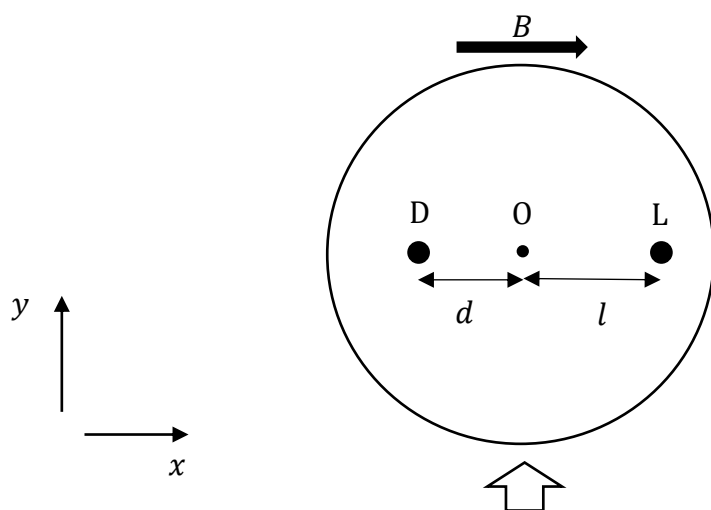
次の文章を読んで、に適した式または数値を、{ }からは適切なものを一つ選びその番号を、それぞれの解答欄に記入せよ。なお、はすでにで与えられたものと同じものを表す。また、問 1 では、指示にしたがって、解答を解答欄に記入せよ。重力は鉛直下向きにかかり、円周率を π 、透磁率を μ とし、空気抵抗は無視できるものとする。微小な角度 $\alpha[\text{rad}]$ に対して $\sin\alpha \simeq \alpha$ となることを必要に応じて利用せよ。

(1) 図 1 (a)のように、円形のターンテーブルを地面に水平に設置する。ターンテーブルの回転軸は中心の点Oを貫く鉛直方向にあり、回転させるときに摩擦力ははたらかないとする。また、ターンテーブルは絶縁体で作られており、その質量は無視できるものとする。ターンテーブル上の点Dと点Lに棒状の導体を鉛直上向きに固定した。図 1 (b)に示すように、点Dは点Oから d の距離に、点Lは点Oから l の距離にあり、線分DL上に点Oがある。これらの導体は導線によって外部電源につながれており、電流を流すことができる。また、棒状の導体は変形せず、太さは無視できるものとする。

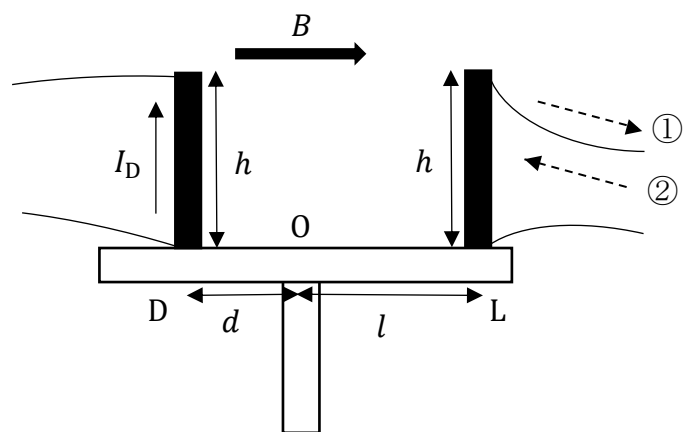
次に、図 1 (b)のように地面上に固定された x 軸と y 軸をとり、 x 軸の正の向きに磁束密度 B の一様な磁場を加えた。図 1 (b)ので示す方向から見ると図 1 (c)のような位置関係になっており、導体の長さはいずれも h である。ここで、点Dに固定した導体に、鉛直上向きに電流 I_D を流すと、この導体には y 軸の正の向きに大きさイの力がはたらく。図 1 (b)のように線分DLが x 軸に平行となるようにターンテーブルを静止させた状態から、電流 I_D と同時に、点Lに固定した導体に電流 I_L を流すと、ターンテーブルは回転せずに静止していた。このとき、点L上に固定した導体に流れる電流の向きは{□ : ①, ②}であり、 I_L の大きさはハである。ここで、導線に流れる電流が作る磁場は無視でき、導線にはたらく力はターンテーブルの回転に寄与しないとする。



(a) 斜め上から見た図



(b) 真上から見た図



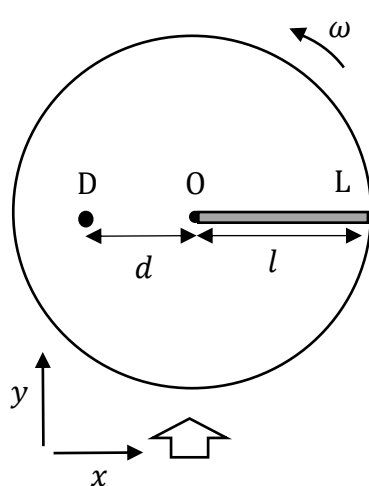
(c) (b)の $\uparrow$ 方向から見た図

図 1

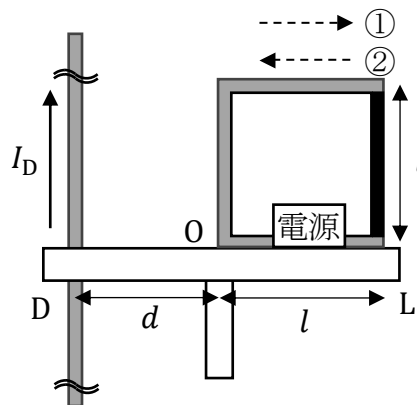
強者の戦略

(2) 図2(a), (b)のように, (1)の状態から磁場を除き, 点D上の導体を, ターンテーブルの上下に十分に長い棒状の導体に変更し, ターンテーブルと共に回るように固定した。この導体の質量および太さは無視できる。また, 点L上の導体の代わりに一辺の長さが l である導体で作られた正方形の枠を, ターンテーブルに垂直になるように線分OL上で固定した。図2(c)のように, 点L上の導体の質量は M であり, 点O上の導体および上側と下側の導体の質量は無視できるものとする。また, 正方形の導体の太さは無視でき, 力を加えられたときにも正方形を保ち, 倒れないものとする。正方形の導体には質量と大きさが無視できる電源により電流 I_L が流れている。点Dに固定した導体に, 図2(b)のように鉛直上向きに電流 I_D を流すと, 線分DL上には y 軸の正の向きに磁場が生じる。磁束密度の大きさは点O上で「二」であり, 点L上で「ホ」である。ここで, 電流 I_L が作る磁場は無視してよい。

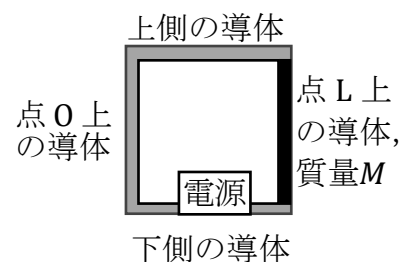
次に, 電流 I_D および I_L が流れている状態で, 図2(a)で示すように正方形の導体を固定させたままターンテーブルを一定の角速度 ω で回転させた。このとき点O上と点L上に生じる磁束密度は, ターンテーブル上の観測者から見てそれぞれ「二」と「ホ」と同じであるとする。回転させた状態で, 正方形の導体の固定を静かにはずしたところ, 正方形の導体は線分OL上から動かず, ターンテーブルとともに角速度 ω で回転し続けた。ターンテーブルの表面はなめらかである。このとき, 正方形の導体に流れる電流の向きは{へ: ①, ②}である。また, I_L の大きさは「ト」である。



(a) 真上から見た図



(b) (a)の 方向から見た図



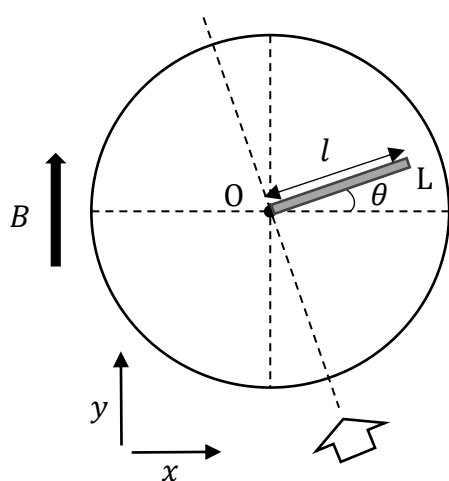
(c) (a)の 方向から見たときの導体の名称

図2

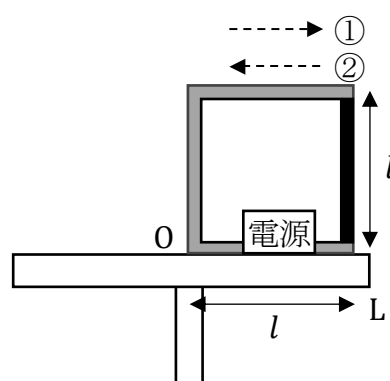
強者の戦略

(3) 図3のように、(2)の状態から点D上の導体を取り除き、 y 軸の正の向きに磁束密度 B の
 一様な磁場を作り、再び線分OL上の正方形の導体をターンテーブルに固定した。さらに、
 図3(a)のように、線分OLを x 軸方向から微小な角度 θ [rad]($\theta > 0$)だけ反時計回りに回し
 た位置でターンテーブルを静止させた。正方形の導体に電流 I_L を流すと、ターンテーブル
 は上から見て時計回りに動き始めた。このとき、正方形の導体には{チ: ①, ②}の向
 きに電流が流れており、正方形の導体の4辺のうち、点L上の導体には、リの大き
 さの力がはたらく。ここで、電流 I_L は電源により時間変化しないように調整されている。

動き始めたターンテーブルは、ある角度だけ時計回りに動いたあと、反時計回りに動
 きだす。点Lの y 座標を変位 Y として表し、この運動を考える。 y 座標の原点を点Oの位置に
 とり、図3(a)のように x 軸方向から微小角 θ だけ反時計回りに回した状態から動き始めた
 時刻を $t = 0$ とする。点L上の導体にはたらく力の線分OLに垂直な成分は、線分OLと x 軸の
 なす角が微小であるとき、 y 軸に平行と近似できる。つまり、この成分は、変位が Y のと
 き、 y 軸の方向を正としてヌ $\times Y$ と書ける。 $t = 0$ から線分OLが x 軸と初めて平行にな
 る時刻までの間にこの力が導体に対してなす仕事の大きさはル $\times \theta^2$ となる。また、
 ターンテーブルが初めて反時計回りに動き始める時刻を $t = T$ とすると、 T はヲと書
 ける。



(a) 真上から見た図



(b) (a)の $\nearrow$ 方向から見た図

図3

強者の戦略

問 1 図 4 を解答欄に描き写し，変位 Y と時刻 t の関係を実線で描け。グラフには $t = 0$ から $t = 2T$ までの変位 Y を描くこと。また，最大と最小の変位 Y の値とそれらの値を取る時刻および $Y = 0$ となる時刻も示すこと。時刻は T を用いて表してよい。



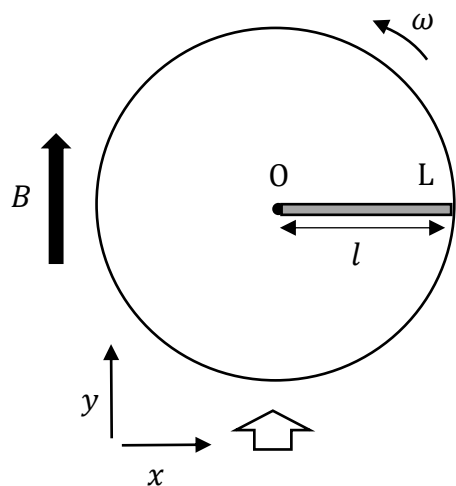
図 4

強者の戦略

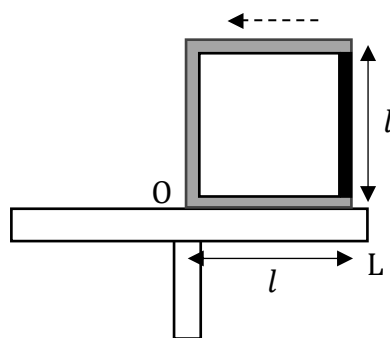
- (4) 図5のように、(3)の状態から電源が接続された部分を取り除き、電源がない導体に置き換えたのちに、ターンテーブルを一定の角速度 ω で反時計回りに回転させた。図5(a)のように線分OLが x 軸に平行な状態の時刻を $t = 0$ とし、任意の時刻 t において正方形の導体に生じる電流を求める。点L上の導体が運動する速度の x 軸成分の大きさは $\boxed{\text{フ}} \times |\sin\omega t|$ である。この運動により正方形の導体には起電力が生じる。図5(b)で示す破線の矢印の向きに電流が流れるときを正の起電力とすると、時刻 t における起電力を $V_0 \times \sin\omega t$ と書くとき、 V_0 は $\boxed{\text{力}}$ となる。正方形の導体の全体での抵抗値を R とすると、時刻 t において流れる電流は $\frac{V_0}{R} \times \sin\omega t$ となる。

次に、 $t = 0$ からターンテーブルを一周させるまでの間に導体で発生するジュール熱を考える。時刻 t における電力は、 V_0 、 R 、 ω のうち必要なものを用いて、 $\boxed{\text{ヨ}} \times \sin^2\omega t$ と書ける。ここで、 $\sin^2\omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$ なので、ターンテーブルを一周させる間での電力の平均は $\boxed{\text{ヨ}} \times 0.5$ となり、一周の間に導体で発生するジュール熱は、 V_0 、 R 、 ω のうち必要なものを用いて $\boxed{\text{タ}}$ と表される。

最後に、ターンテーブルを角速度 ω で回転させた状態から、回転させるために必要であった外力を静かに取り除いた。すると、ターンテーブルの角速度は{ レ ：①増加した、②変化しなかった、③減少した}。



(a) 真上から見た図



(b) (a)の $\nearrow$ 方向から見た図

図5

強者の戦略

2026 年度 京大物理 第 2 問 [解答解説編]

【解答】

(1)

$$\boxed{\text{イ}} : BI_D h \quad \{ \boxed{\text{ロ}} \} : \text{①} \quad \boxed{\text{ハ}} : \frac{d}{l} I_D$$

(2)

$$\boxed{\text{ニ}} : \frac{\mu I_D}{2\pi d} \quad \boxed{\text{ホ}} : \frac{\mu I_D}{2\pi(d+l)} \quad \{ \boxed{\text{ヘ}} \} : \text{①}$$

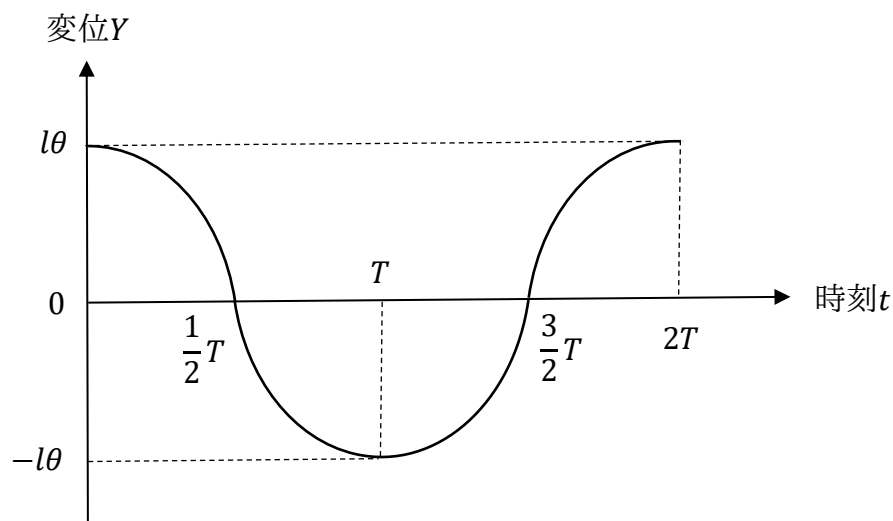
$$\boxed{\text{ト}} : \frac{2\pi d(d+l)M\omega^2}{\mu I_D l}$$

(3)

$$\{ \boxed{\text{チ}} \} : \text{①} \quad \boxed{\text{リ}} : BI_L l \quad \boxed{\text{ヌ}} : -BI_L \quad \boxed{\text{ル}} : \frac{1}{2} BI_L l^2$$

$$\boxed{\text{ヲ}} : \pi \sqrt{\frac{M}{BI_L}}$$

問 1



(4)

$$\boxed{\text{ワ}} : l\omega \quad \boxed{\text{カ}} : -Bl^2\omega \quad \boxed{\text{コ}} : \frac{V_0^2}{R} \quad \boxed{\text{タ}} : \frac{\pi V_0^2}{\omega R}$$

$$\{ \boxed{\text{レ}} \} : \text{③}$$

強者の戦略

【解説】

では、2026年度の京都大学の物理の第2問の解説です。

- (1) まず、点Dに固定した導体にはたらく力の大きさ f_D は

$$f_D = BI_D h$$

です（向きはy軸の正の向き）。ターンテーブルが回転せずに静止していたことから、点L上に固定した導体にはy軸の正の向きに力がはたらくことになり、点L上に固定した導体に流れる電流の向きは図1(c)の①の向きあることが分かります。点Lに固定した導体にはたらく力の大きさ f_L は

$$f_L = BI_L h$$

となるので、力のモーメントのつりあいより

$$(BI_D h)d = (BI_L h)l \quad \therefore I_L = \frac{d}{l} I_D$$

であることが分かります。

- (2) 点Dに固定した導体に鉛直上向きに電流 I_D を流すとき、点O、点L上での磁束密度の大きさ B_O 、 B_L はそれぞれ

$$\begin{cases} B_O = \mu \left(\frac{I_D}{2\pi d} \right) = \frac{\mu I_D}{2\pi d} \\ B_L = \mu \left\{ \frac{I_D}{2\pi(d+l)} \right\} = \frac{\mu I_D}{2\pi(d+l)} \end{cases}$$

です（向きはy軸の正の向き）。すると、点O、点L上の導体にはたらく力の大きさ F_O 、 F_L はそれぞれ

$$\begin{cases} F_O = B_O I_L l = \frac{\mu I_D I_L l}{2\pi d} \\ F_L = B_L I_L l = \frac{\mu I_D I_L l}{2\pi(d+l)} \end{cases}$$

です。よって、 $F_O > F_L$ となることが分かります。

ここからターンテーブル上の観測者から見るとどうなるかを考えてみましょう。点L上の導体を受ける遠心力はO→Lの向きにはたらくますが、正方形の導体が線分OL上から動かなかったことから、点O、点L上の導体にはたらく力の合力はL→Oの向きにはたらくなければならないことが分かります。このことと $F_O > F_L$ より、正方形の導体に流れる電流の向きは①であることが分かります。そして、正方形の導体についての力のつりあいより

$$Ml\omega^2 + \frac{\mu I_D I_L l}{2\pi(d+l)} = \frac{\mu I_D I_L l}{2\pi d} \quad \therefore I_L = \frac{2\pi d(d+l)M\omega^2}{\mu I_D l}$$

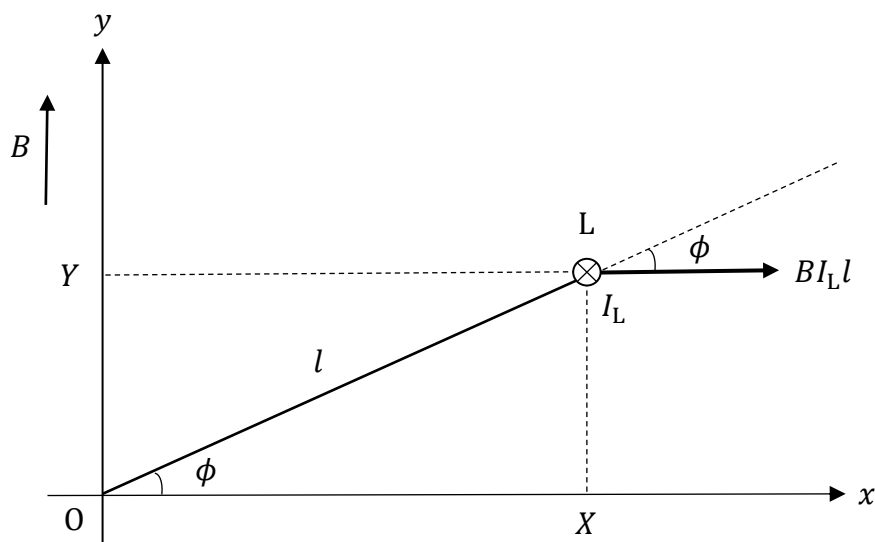
となります。

強者の戦略

(3) y 軸の正の向きに磁場を作り，正方形の導体に電流 I_L を流すと，ターンテーブルが上から見て時計回りに動き始めたことから，正方形の導体には①の向きに電流が流れていることが分かります。点L上の導体にはたらく力の大きさ F_L は

$$F_L = BI_L l$$

です。



点L上の導体にはたらく力の線分 OL に垂直な成分 F は，線分 OL と x 軸のなす角 ϕ が微小であるとき， y 軸に平行と近似し， y 軸の方向を正として

$$F = -BI_L l \sin \phi$$

となります。ここで変位 Y について

$$Y = l \sin \phi$$

であることから

$$F = -BI_L Y$$

と書けることが分かります。ここで

$$k = BI_L$$

と置いて

$$F = -kY$$

としましょう。

強者の戦略

すると、 $t = 0$ から線分OLが x 軸と初めて平行になる時刻までの間にこの力が導体に対してなす仕事の大きさ W は、角 θ が微小であることから $l\sin\theta \equiv l\theta$ として

$$W = \int_{l\sin\theta}^0 (-kY) dY = \left[-\frac{1}{2}kY^2 \right]_{l\theta}^0 = \frac{1}{2}k(l\theta)^2$$

となり、 k を元に戻して

$$W = \frac{1}{2}BI_L l^2 \theta^2$$

となることが分かります。また、ターンテーブルが初めて反時計回りに動き始める時刻を $t = T$ とすると、 T はこの微小振動の周期 T_0 の半分です。まず、微小振動の周期 T_0 は

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}}$$

ですが、 k を元に戻して

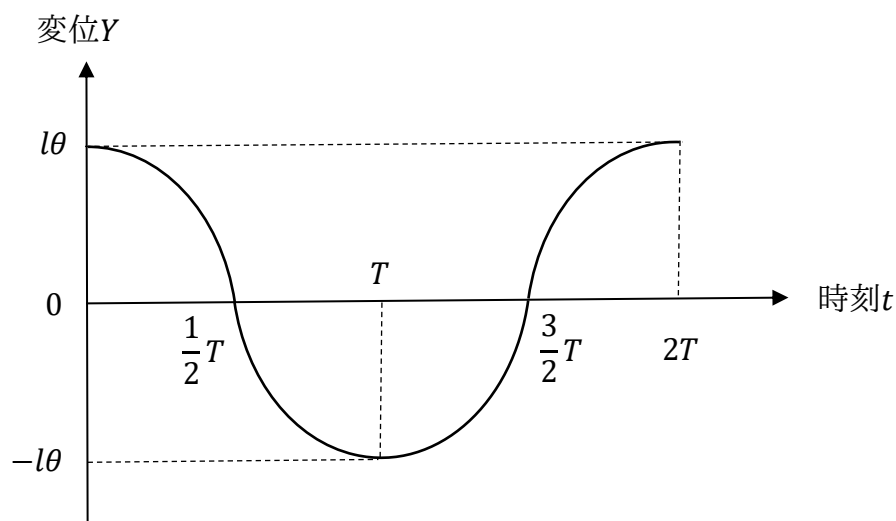
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M}{BI_L}}$$

となることから

$$T = \frac{1}{2}T_0 = \pi \sqrt{\frac{M}{BI_L}}$$

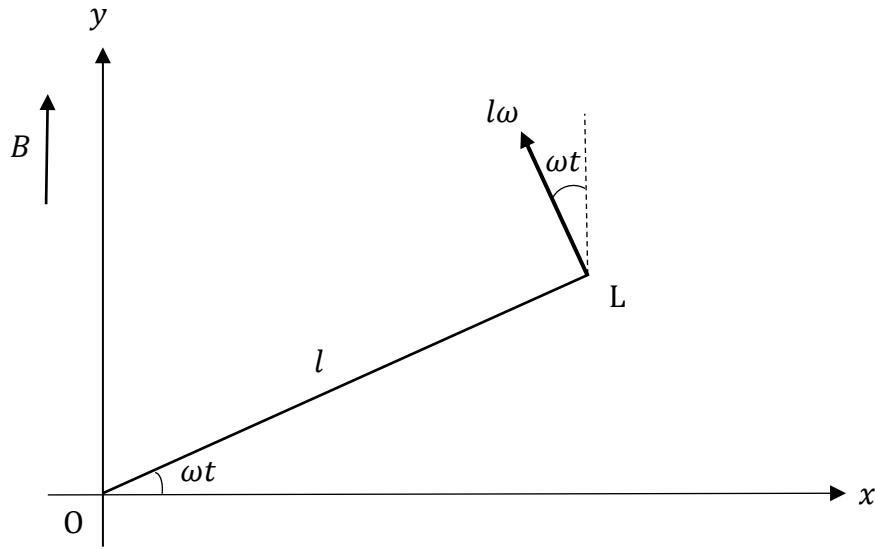
と書けることがわかります。

問 1



強者の戦略

(4)



まずは、任意の時刻 t において正方形の導体に生じる電流を求めましょう。時刻 t において点 L 上の導体が運動する速度の x 軸成分 v_x について

$$v_x = -l\omega \sin \omega t$$

となるので、その大きさ $|v_x|$ は

$$|v_x| = l\omega |\sin \omega t|$$

です。図5(b)で示す破線の矢印の向きに電流が流れるときを正の起電力とすると、時刻 t における正方形の導体に生じる起電力 V は

$$V = +v_x B l = -B l^2 \omega \sin \omega t$$

となるので、 $V = V_0 \times \sin \omega t$ と書くとき

$$V_0 = -B l^2 \omega$$

です。正方形の導体の全体での抵抗値を R とすると、時刻 t において流れる電流 I は、キルヒホッフの法則より

$$V_0 \sin \omega t - R I = 0 \quad \therefore I = \frac{V_0}{R} \sin \omega t$$

となります。

強者の戦略

次に、 $t = 0$ からターンテーブルを一周させるまでの間に正方形の導体で発生するジュール熱を考えてみます。時刻 t における正方形の導体の消費電力 P は

$$P = RI^2 = \frac{V_0^2}{R} \sin^2 \omega t$$

と書けます。よって、ターンテーブルを一周させる間での正方形の導体の消費電力の平均 $\langle P \rangle$ は

$$\langle P \rangle = \frac{V_0^2}{R} \langle \sin^2 \omega t \rangle$$

となりますが、 $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$ なので

$$\langle P \rangle = \frac{V_0^2}{R} \left\langle \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right\rangle = \frac{V_0^2}{R} \cdot \frac{1 - \langle \cos 2\omega t \rangle}{2}$$

となり、 $\langle \cos 2\omega t \rangle = 0$ であることから

$$\langle P \rangle = \frac{V_0^2}{R} \cdot \frac{1 - 0}{2} = \frac{V_0^2}{R} \times 0.5$$

となります。ちなみに

$$\left\langle \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right\rangle = \frac{1 - \langle \cos 2\omega t \rangle}{2}$$

は平均値の線形性を用いていますが、これは平均値が積分で定義され、積分に線形性があるためです。個人的には一気に $\langle \sin^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2}$ として良いのではないかと思います（普段の授業ではそうしています）。すると、ターンテーブルを一周させる間に正方形の導体で発生するジュール熱 W は

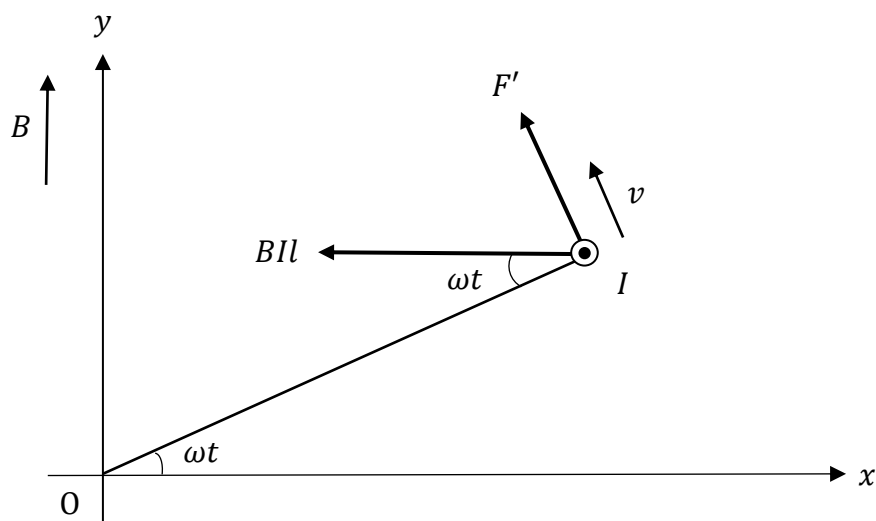
$$W = \langle P \rangle \cdot \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi V_0^2}{\omega R}$$

と表されます。

最後に、ターンテーブルを角速度 ω で回転させた状態から、回転させるために必要であった外力を静かに取り除くと、正方形の導体で発生するジュール熱により正方形の導体（点L上の導体）の運動エネルギーが減少することになり、ターンテーブルの角速度は減少することになります（→③）。このエネルギー関係については以下の参考でもう少し詳しく説明しましょう。

強者の戦略

参考



先程のエネルギー関係の導出をしてみます。点L上の導体の速度を v とし、正方形の導体を回転させるために必要であった外力を点L上の導体に加えるとして、その回転の接線成分を F' とします。すると、時刻 t における運動方程式は

$$M \frac{dv}{dt} = F' + Bl \sin \omega t \dots ①$$

となります。また、時刻 t において点L上の導体に生じる誘導起電力は

$$V = -(v \sin \omega t) Bl = -v Bl \sin \omega t$$

となるので、時刻 t におけるキルヒホッフの法則は

$$-v Bl \sin \omega t - RI = 0 \dots ②$$

となります。これからエネルギー関係を導きます。① $\times v$ より

$$Mv \frac{dv}{dt} = F'v + Blv \sin \omega t \dots ③$$

となり、② $\times I$ より

$$-v Bl \sin \omega t - RI^2 = 0 \dots ④$$

となるので、③、④より

$$Mv \frac{dv}{dt} = F'v + (-RI^2) \quad \therefore RI^2 = F'v + \left\{ -\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Mv^2 \right) \right\}$$

です。この関係式は単位時間当たりのエネルギーの関係式ですが

$$(\text{抵抗のジュール熱}) = (\text{外力の仕事}) + (\text{運動エネルギー減少})$$

という意味があります。回転させるために必要であった外力を静かに取り除くと

$$(\text{抵抗のジュール熱}) = (\text{運動エネルギー減少})$$

となる訳です。

強者の戦略

本当は、どこに外力を加えているか分からないので、正方形の導体を剛体と考えて、「剛体の回転運動についての運動方程式」を考えて導出する必要があります。ただし、「剛体の回転運動についての運動方程式」は高校の範囲外なので（1980年代までは高校範囲内だったそうですが）、今回はここまでにしておきましょう。私（網干）が担当している「高3東大京大特選物理」の夏期講習の授業では「剛体の回転運動についての運動方程式」の話を発展事項として少し説明しているので、その授業を受けた人はどのようなになるかは是非一度考えてみてください。

ということで、問題の解説は以上になります。この問題は、ターンテーブル上の正方形の導線についての考察をテーマにした問題でしたが、今までありそうであまりなかった設定です。目新しいといえば目新しいですが、難易度は京大の標準レベルで、一つ一つ丁寧に解けば完答も十分に可能な問題だったと思います（問がグラフだけだったこともあり）。最初は「ターンテーブル」と書かかれているのを見て、「もしや出題者は休日に趣味でDJをしていてそこから問題のネタを」などと妄想しましたが、そうではなかったようです。京大の問題に目新しさを期待し過ぎですね笑。

それでは、次回は2026年の京大第3問の解説でお会いしましょう。