

現役合格への 軌跡

2025 年度 神戸大物理 第2問 [問題編]

今回は 2025 年度の神戸大の第2問（電磁気問題）について解説します。第1問（力学問題）に引き続き、レベルや設定としては典型的な入試問題と言えますが、神戸大らしさが問5（最終問題）に登場します。この問題をどう処理したか、で合否が変わったかも知れません。では、チャレンジしてみてください。

II 電磁気

以下の問1～5に答えなさい。文中に与えられた物理量の他に解答に必要な物理量があれば定義して明示しなさい。ただし最終的な解答は問題文で与えられた物理量を用いて書き表しなさい。解答の導出過程も示しなさい。

図1のような長さ l 、断面積 S の導体の両端 A と B の間に電圧 V が加えられている。導体内には電荷 $-e$ ($e > 0$) をもった自由電子が一様に単位体積当たり n 個存在している。

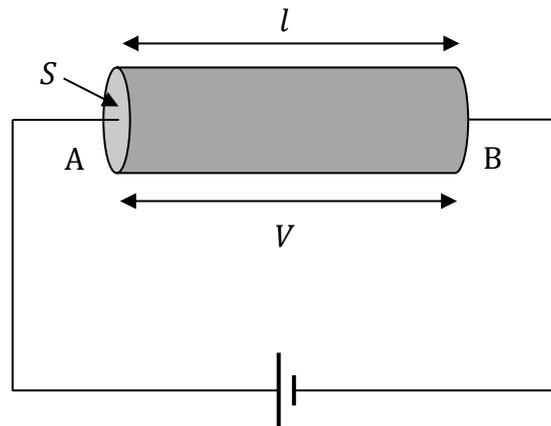


図1

問1 導体内の電場の大きさと向きを答えなさい。また導体内の1個の自由電子が電場から受ける力の大きさと向きを答えなさい。

問2 自由電子は導体中の陽イオンと衝突して抵抗力を受けるため、平均して一定の速さ v で運動する。抵抗力の大きさを kv (k は比例定数) と仮定したとき、 v の大きさを求めなさい。また電流および電気抵抗の大きさを求めなさい。

問3 1個の自由電子が電場からされる単位時間当たりの仕事を求めなさい。また導体から発生する単位時間当たりのジュール熱を求めなさい。

次に図2のように水平面内に間隔 L で平行に置かれた2本の導線 L_1, L_2 , 抵抗 R_1 , スイッチ S_1 からなる回路を考える。導体棒は導線と垂直な状態を保ちながら摩擦なしで動くように置かれており, 紙面に垂直に紙面の裏から表に貫く向きの磁束密度 B の一様な磁場の中に置かれている。ここで, 図2において R_1 の抵抗値を R とし, R_1 以外の部分での電気抵抗はすべてゼロであるとする。また導線と導体棒を流れる電流から生じる磁場は無視する。なお, 導体棒と導線 L_1, L_2 の接点をそれぞれ C, D とする。

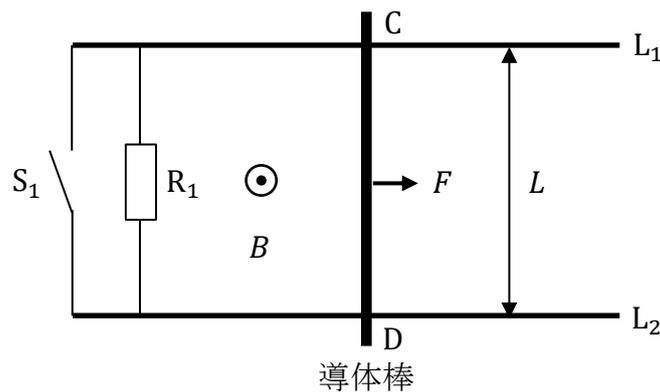


図2

- 問4 S_1 を開いた状態で導体棒を図2のように導線に平行な一定の力 F で引いたところ, 棒は一定の速さ u で運動した。導体棒の中の電流の向きと大きさを答えなさい。また導体棒の速さ u , および抵抗 R_1 で発生する単位時間当たりのジュール熱を求めなさい。
- 問5 導体棒が静止している状態で S_1 を閉じ, 図2のように導体棒を導線に平行な一定の力 F で引いたところ棒は静止した状態を保っていた。なぜそのようになるのか説明しなさい。

【解答】

問1 電場の大きさを E とし、 $E = \frac{V}{l}$ (向き: 図の右向き)

1 個の自由電子が電場から受ける力の大きさを f とし、

$$f = eE = \frac{eV}{l} \quad (\text{向き: 図の左向き})$$

問2 1 個の自由電子に関する力のつりあいより、

$$\frac{eV}{l} = kv \quad \therefore v = \frac{eV}{kl}$$

電流の大きさを I とし、電流の計算式より、

$$I = vSne = \frac{eV}{kl} \times Sne = \frac{ne^2SV}{kl}$$

電気抵抗の大きさを R' とし、上式とオームの法則より、

$$R' = \frac{V}{I} = \frac{kl}{ne^2S}$$

問3 1 個の自由電子が電場からされる仕事率を p_E とし、

$$p_E = fv = \frac{eV}{l} \times \frac{eV}{kl} = \frac{(eV)^2}{kl^2}$$

単位時間あたりのジュール熱を $P_{R'}$ とし、

$$P_{R'} = p_E \times lSn = \frac{nS(eV)^2}{kl}$$

問4 ファラデーの電磁誘導の法則より、導体棒 CD に生じる誘導起電力の大きさは uBL である。また、レンツの法則より、導体棒中で電流は C→D の向きに流れる。その電流の大きさを i とし、キルヒホッフの法則より、

$$uBL = Ri \quad \therefore i = \frac{uBL}{R} \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

導体棒に関する力のつりあいと①より、

$$F = iBL \rightarrow F = \frac{uBL}{R} \times BL \quad \therefore u = \frac{RF}{(BL)^2} \quad \dots \quad \textcircled{2}$$

また、抵抗 R_1 で発生する単位時間あたりのジュール熱を P_R とし、エネルギー関係より、

$$P_R = Fu = \frac{RF^2}{(BL)^2}$$

問 5 S_1 を閉じると短絡により R_1 に電流が流れなくなるため、電流が流れる部分全体の抵抗はゼロとなる。このような状況では、力 F を加えた直後に導体棒に発生する微小な速さ（ほぼゼロとみなせる）により発生する微小な誘導起電力によって、回路には速やかに力 F とつりあうだけの電磁力を生じさせる誘導電流 i が流れるようになるため。

【解説】

問 1 いつもの通り、問 1 は肩慣らし問題です。長さ l の導体に電圧（電位差） V を加えたのですから、一様電場の公式を用いて $E = \frac{V}{l}$ とササッと答えます。電場の向きはもちろん高電位側→低電位側です。そして電場とは「試験電荷（電気量 $+1\text{ C}$ の点電荷）が受ける静電気力」のことですから、この定義に沿って自由電子が受ける力の大きさを $f = eE = \frac{eV}{l}$ と答えます。ただし、電子は負の電荷ですから、力の向きは電場の向きと逆向きになることにだけ注意です。ここは間違えずに素早く解きたいところですね。

問 2 ここも可能な限り素早く解きましょう。まずは v からですが、これは自由電子が「一定の速さで運動する」とありますから力のつりあいとなりますね。電場からの静電気力と陽イオンとの衝突による抵抗力がつりあう、ということで、

$$\frac{eV}{l} = kv \quad \therefore v = \frac{eV}{kl}$$

となります。

次に電流ですが、ここでは電流に関する知識が問われます。電流とは、「ある断面を単位時間に通過する電気量」のことです。よって、断面積 S の導体断面を通過する電気量を計算すればよいのですが、本問では自由電子が一定の速さ v で運動していますから、単位時間に注目断面を通過できる自由電子は断面から測って距離 v 以下の範囲にある自由電子です。その範囲の体積は vS ですから、その中にある自由電子の数は $vS \times n$ です。よって、電流は $I = (vS \times n) \times e = vSne$ となるわけですね。これは公式として暗記している人も多いかと思います。この式が頭に浮かべば、先ほど求めた v の値を代入して、

$$I = vSne = \frac{eV}{kl} \times Sne = \frac{ne^2SV}{kl}$$

となります。

最後に電気抵抗ですが、これはオームの法則の出番ですね。上の式を用いて、

現役合格への 軌跡

$$R' = \frac{V}{I} = \frac{kl}{ne^2S}$$

と変形すれば完成です。

問 3 電場からされる単位時間当たりの仕事（仕事率）は仕事の定義に沿って計算しましょう。仕事は力と移動距離の積で計算されますが、単位時間あたりですので移動距離とはすなわち速さ v です。よって、

$$p_E = fv = \frac{eV}{l} \times \frac{eV}{kl} = \frac{(eV)^2}{kl^2}$$

です。そして単位時間あたりのジュール熱ですが、これは本問の誘導の流れを考えると、電場からされた仕事がすべて熱エネルギーに変換されているというエネルギー関係から求めるべきでしょう。すなわち、さきほどの p_E は自由電子 1 個あたりがされる仕事率であり、導線内には合計 $lS \times n$ 個の電子があることを鑑みて、

$$P_{R'} = p_E \times (lS \times n) = \frac{nS(eV)^2}{kl}$$

となります。なお、別解としては、 $P_{R'}$ が導体（ここでは抵抗と同義）における消費電力であることから、消費電力の公式を用いて $P_{R'} = \frac{V^2}{R'} = \frac{V^2}{\frac{kl}{ne^2S}} = \frac{nS(eV)^2}{kl}$ と求めることができます。

さて、ここまではいかがだったでしょうか？導体（抵抗）で熱が発生する原理を、自由電子の運動やエネルギーに注目して解く、という流れですが、難しかったですか？そう、これを難しいと感じてはいけません。ここまでと次の問 4 までは完全に検定教科書レベルであり、ほぼ同じ内容が検定教科書に掲載されています。すなわち、ここまでは（もっと言うなら次の問 4 までは）完答すべき問題だと言えるでしょう。

問 4 ここから問題設定が変わります。神戸大では珍しく、1つの大問の中に2つの別設定の問題がある形となりました。本問から電磁誘導の問題となりますので、頭を切り替えましょう。まずは回路に流れる電流ですが、これは即答ですね。導体棒には大きさ uBL の誘導起電力が D 側を正極として発生しますので、電流は導体棒中では C→D の向きに流れ、その大きさはキルヒホッフの法則から

$$uBL = Ri \quad \therefore \quad i = \frac{uBL}{R}$$

です。次に速さ u ですが、これも問 2 と同様に「棒は一定の速さ u で運動した」という記述から導体棒に関する力のつりあいを立てることになります。つりあうのはもちろん電流が磁場から受ける電磁力 iBL と外力 F ですから、

$$F = iBL \rightarrow F = \frac{uBL}{R} \times BL \quad \therefore u = \frac{RF}{(BL)^2}$$

です。最後に抵抗 R_1 で発生する単位時間当たりのジュール熱ですが、これは素直に消費電力の公式を使って、

$$P_R = Ri^2 = R \left(\frac{uBL}{R} \right)^2 = \frac{(BL)^2}{R} u^2 = \frac{(BL)^2}{R} \times \left\{ \frac{RF}{(BL)^2} \right\}^2 = \frac{RF^2}{(BL)^2}$$

と計算しても問題ないですし、こちらの方が実戦的かも知れません。模範解答はより発展的な「系のエネルギー関係」を用いています。すなわち、本問では「(外力がした仕事率) = (抵抗の消費電力)」という関係が成立しますので、この関係を使うと素早く解くことができます。このような「注目している系のエネルギー関係」が見抜ける人はかなり物理が仕上がった人だと言えますのでご参考までに。

問5 さて、最終問題です。説明問題なのですが、論理が非常に組み立てにくいです。まず「棒は静止した状態を保っていた」という部分だけを見て電磁気の知識を用いると、得られる結論は「棒に誘導起電力が発生しない → 回路に電流が流れない → 棒には磁場からの電磁力がはたらかない」となります。しかし一方で「棒を導線に平行な一定の力 F で引き」ているのですから、静止し続けるためには「棒には力 F とつりあうだけの電磁力がはたらく → 回路には電流が流れている」と考えなければなりません。この矛盾をどう解決するかが最大のポイントです。それを解決してくれるのが本問の問題設定である「 S_1 を閉じた」です。これをヒントにして順に論理を組み立てていきましょう。

S_1 を閉じると抵抗 R_1 と左端の導線部分が並列となります。導線部分の電位差は常にゼロですので、抵抗 R_1 の電位差も常にゼロとなります。よって、オームの法則より、抵抗 R_1 に流れる電流は常にゼロとならなければなりません。すなわち、 S_1 を閉じると抵抗 R_1 には一切電流が流れなくなるのです。これは有名な「短絡 (ショート)」とよばれるもので、知識として知っている人も多いでしょう。となると、この回路において抵抗 R_1 は存在価値を失います。電流が流れる部分は抵抗 R_1 以外の部分になり、問題設定により抵抗 R_1 以外の部分の抵抗はすべてゼロです。すなわち、本問の回路は(問題集ではほとんど見かけない) 電池もコイルもコンデンサーも抵抗もない、いわば「電位差を生じるものが何もない回路」となるのです。これに気づくことが重要です。

次に、電流が発生する理由を考えましょう。ここは深く考えだすと泥沼にはまりますので、あくまで導くべき結論に向かって論理を組み立てましょう。上記の“何もない”回路に電流を発生させるにはどうすればいいか? それは非常に簡単で、棒に微小な電圧を一瞬でも発生させることができればよいのです。抵抗がないので電流は常に流れ続けることができます。すなわち、本問は、「はじめに導体棒にほぼゼロとみなせる速さが発生した結果、外力 F とつりあうだけの電磁力を発生させる電流が発生した」ととらえればよいのです。「ほぼゼロとみなせる速さ」というのがポイントで、これは「棒は静止した状態を保っていた」と同じ意味になります。このようにして、導体棒の静止と電流の

現役合格への 軌跡

発生を矛盾なく説明できるのです。

以上を簡潔にまとめたものが模範解答です。いかがでしょうか？ただし、実際の入試における戦略を考えると、この問題に固執して時間を使いすぎるのはあまりおススメしません。抵抗ゼロの回路というあまり見たことの設定であり、論理の組み立ても難しく、それをまとめて文章にする力も必要で、解けてもかなりの時間を消費することが予想されます。実は神戸大の過去問を調べると、本問のように最終問題だけ非常に難易度の高い問題が出題されることがあります。個人的には医学部医学科受験者をターゲットにした選抜問題なのかな、と思うくらいです。となると、実際の入試では、本問は早々に見切りをつけて他の大問に手を付ける、といった戦略でよいと感じます。

以上、いかがだったでしょうか？ここまで読んでいただいた皆さん、ありがとうございました。次回は2025年の神戸大第3問の解説をします。