

1 初めに

試験日程 : 2/8(月)9:00 10:30

持ち込み不可です。

授業中に配布された過去問は小田先生担当分だけらしいので何とも言えませんが、過去問を見るにあたり、数式を扱う問題は同じ3問をローテーションしてるだけなのでこれだけ抑えれば良さそうです。最終回に扱った空間電荷分布測定問題は8年連続で出題されているので、今年も出題されることでしょう。むしろ過去問配つといて期待させといて、今年だけ8年続いた伝統を打ち砕いてイノベーション起こすとか勘弁してください。

説明問題に関しても同様の問題が出題される傾向にあるので、このシケプリの方向性としては

- 頻出の3題を解説。
- 過去問で出題された内容に関して、解答を示すかたちで解説。
- 余力があったら全体を網羅して解説。
- さらに余力があったら小野先生の担当分も解説。ただ電磁気やっただけなので各自で勝手に
((

てな感じでいきたいと思います。間違い等ありましたら訂正のほどよろしくお願いします。

2 頻出3題の解答

2.1 空間電荷分布測定

2008年度問1の条件下で解くので、図は過去問を参照してください。

1) 各電界強度を3つの関係式で表せ。

はい、あれです。誘電体界面での電界接続条件です。忘れた人は電気磁気やってください。

$$\epsilon_1 E_2 - \epsilon_m E_b = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon_m E_b - \epsilon_m E_a = \rho(r) dr \quad (2)$$

$$\epsilon_m E_a - \epsilon_1 E_1 = 0 \quad (3)$$

2) なぜか電極 2 が設置なので、

$$V_1 = E_1 x_1 + E_a(r - x_1) + E_b(t - (r - x_1)) + E_2 x_2 \quad (4)$$

3) 電荷が r 方向に分布しているときは、2) 式は

$$V_1 = E_1 x_1 + \int_0^t \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} E_1 + \frac{1}{\epsilon_m} \int_0^r \rho(r') dr' \right) dr + E_2 x_2 \quad (5)$$

となります。簡単のために $r \rightarrow r + x_0$ により積分区間を変換しています。

ここで、 E_1 の電界だけによる電極間の電位差を考えます。 E_1 による電位差は

$$\left(x_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} t + x_2 \right) E_1 \quad (6)$$

であり、これは V_1 と誘電体境界の等価電荷を用いて、

$$\left(x_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} t + x_2 \right) E_1 = V_1 - \frac{\sigma_1}{\epsilon_m} t - \frac{\sigma_2 + \sigma_1}{\epsilon_1} x_2 \quad (7)$$

と表されます。

式 (7) の左辺を式 (5) を代入して変形すると、

$$\left(x_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} t + x_2 \right) E_1 = V_1 - \frac{1}{\epsilon_m} \int_0^t (t - r) \rho(r) dr - \frac{x_2}{\epsilon_1} \int_0^t \rho(r) dr \quad (8)$$

が得られます。この変形には、

$$E_1 = E_2 - \frac{1}{\epsilon_1} \int_0^t \rho(r) dr \quad (9)$$

と、重ね合わせの原理を用いて得られる

$$\int_0^t \left(\int_0^r \rho(r') dr' \right) dr = \int_0^t (t - r) \rho(r) dr \quad (10)$$

の 2 式を用いています。

式 (7) と式 (8) を比較すると、

$$\sigma_1 = \frac{1}{t} \int_0^t (t-r)\rho(r)dr \quad (11)$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \int_0^t \rho(r)dr \quad (12)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{t} \int_0^t r\rho(r)dr \quad (13)$$

が得られます。これにより、上記のように等価的な 2 種類の電荷 σ_1 、 σ_2 を置くことで、外部の電位分布を決めることができることが証明されます。

4) 式 (7) において、 $x_1 + x_2 = const$ と x_1 、 x_2 をかえて V_1 を測定した 3 式を連立することで、 E_1 、 x_1 、 x_2 の 3 つのパラメータを得ることができます。

2.2 帯電粒子の動力的現象

2008 年度問 2 を回答します。

帯電粒子の運動方程式は、

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + 6\pi\eta a \frac{dr}{dt} = qE_e(r, t) + F_e(r, t) + F_m(r, t) \quad (14)$$

ですが、電界を印可されると qE_e (クーロン力) $\gg F_e$ (その他の静電気力), F_m (重力) であるため、

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} + 6\pi\eta a \frac{dr}{dt} = qE_e(r, t) \quad (15)$$

となります。これを解くと (簡単な微分方程式なので解法は勘弁してください)、

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{qE_e}{6\pi\eta a} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\frac{m}{6\pi\eta a}}\right) \right) \quad (16)$$

が得られます。これが挙動です。これより時定数、終端速度は明らか。

2.3 チャイルド則の証明

空間電荷制限電流の導出をします。2007 年問 2 を解きますが、2005 年問 3 等も同様の問題なのでこれも出る可能性大。

電流密度は、以下によって表されます。

$$J = \rho v = \mu E \epsilon_0 \frac{dE}{dx} \quad (17)$$

$\rho = \epsilon_0 \frac{dE}{dx}$ 、 $v = \mu E$ の説明とか (ry。両辺 dx かけて積分して変形すると、

$$E(x) = \left(\frac{2J(x+x_0)}{\mu\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

が得られます。 x_0 は位置のオフセットなので 0 っておいちゃいましょう。これを

$$- \int_d^0 E(x) dx = V \quad (19)$$

に代入すると、

$$J = \frac{9}{8} \epsilon_0 \mu \frac{V^2}{d^3} \quad (20)$$

の空間電荷制限電流が得られます。

空間電荷電流は低電界ではオームの法則に従いますが、高電界では一般にオームの法則からずれて非直線的に増加します。その代表的なモデルがこの空間電荷制限電導で、バルク電流が注入電流より小さいと負性空間電荷が陰極前面に形成され、伝導電流は空間電荷で制限されるため、式 (20) で表される電圧-電流特性を持つようになります。よく分からないと思った人、大丈夫。書いた本人もよく分かってません。まあ要は、高電界を印可するのでは電界が空間電荷電流に支配されるようになるので、オームの法則じゃなくて、式 (18) で得られる電界に支配されるようになるって考えればいいっぽいです。

3 その他の問題の解答

3.1 静電気応用技術（環境汚染対策技術）

電気集塵装置 電気集塵装置は、ガス中に浮遊する微細な固体、液体の粒子を静電力を利用して除去する装置である。各種の工業設備から発生する粒子上汚染物質の除去や、正常な空気環境（クリーンルーム、病院など）を作り出すための塵埃の除去広く用いられている。原理は、まず接地された円筒電極の中心に、火花電圧よりもやや低い高電圧を印可して、集塵空間を作る。集塵空間中では放電極から円筒電極に向けて強力な直流電界が形成されており、同時に前者から後者に向かう負イオンのシャワーがしょうじているので、粒子はその射突を受けて負に荷電され、クーロン力の作用をうけて円筒電極内面上に層状に帯電する。粒子の一部はグラデーディエント力により放電極にも堆積するが、これはコロナ放電を阻害して集塵率を悪化させるため、適当な時間ごとに集塵極、放電極ともにつち打ちを行って堆積粒子層を剥離する。

電気集塵装置のメリットとしては、1) 集塵性能が高い、2) 省エネルギー（圧力損失低くファンの動力費があまりいらぬ、高電圧を用いるが電流が小さいために電力消費が少ない）、3) 省資源的（部品の取り替えがほぼいらぬ）、4) 保守が容易（可動部分ないし故障とかな）、5) 使用条件が広い（広い温度・圧力条件で使用することができる）があげられる。デメリットとしては、1) 建設費が高い（放電極の絶縁支持、直流高圧電源で初期コスト高い）、2) 性能がダストの電気抵抗率に支配される、3) サブミクロン粒子にたいする性能が低い、4) つち打ちによる再飛散がある、5) 装置が大型になる（ガス流速が速くなりすぎると堆積したダストの流体力学的再飛散が生じるため、断面積を大きくとらざるをえない）、6) 粘着性ないし虎穴性を有する粒子に適用できない。7) 爆発性混合期待や可燃性粉体には適用が困難、などがある。

静電選別 静電選別は、静電気現象を応用して物質の分離、精製、分級などを行う技術である。比重選別、浮遊選別、磁力選別などの方法では十分に選別できないものが静電選別では行えることが多いため、応用範囲が多岐に渡っている。

実用的には導電率の差を利用して、導電性粒子は電極に接触すると反発するのにたいし、絶縁性粒子は反発力が働かず、電気二重層の形成などにより電極に吸着することを利用して選別を行う。方式としては、コロナ帯電、摩擦帯電などを利用した方法がある。

プラズマガス処理 誘電体バリア放電、沿面放電により生成される大気圧非熱平衡プラズマによる化学反応で、解離性生物（O、N、OH、H）、イオン（ O^- 、 N_2^+ ）励起分子が生成される。これらの生成物は一般に反応性が高く、活性種と呼ばれており、この活性種の反応により殺菌や、 NO_xSO_x 等の排ガス処理、揮発性有機物やダイオキシンなどの有害な化学物質の分解を行っている。

3.2 静電気応用技術（画像表示）

静電写真 ゼログラフィ：以下のプロセスにより作像する。1) 帯電：感光体を一様に帯電する。2) 露光：像状に露光する。露光部分は電導性となり、電荷が減少し、静電荷のパターンが得られる。これを静電潜像と呼ぶ。3) 現像：帯電した着色粒子（トナー）を潜像に電氣的に付着させて可視像を得る。4) 転写：感光体上のトナー像を紙に転写する。5) 定着：上条のトナーを溶融して紙に固着させる。6) 清掃：転写後感光体上に残留しているトナーを除去し、感光体を再使用する。上記のプロセスを用いて印刷する。

特徴としては、乾式で通常時に複写可能なうえに、印刷機に匹敵する高速性を鵜飼している。さらなる高速化のためにスキャン方式ではなくベルト状感光体を利用してこれを走行させながら、その平面部分に短時間で全面フラッシュ露光をを行う方法が開発された。7200枚/時で印刷機に匹敵するコピー速度だそう。

カラー複写機 静電写真と同様のプロセスを、アナログの場合3色で行う。帯電後、緑色フィルタを用いて色分解露光を行った後、マゼンタトナーで現像、普通紙に転写する。同様のプロセスを青色露光イエロー現像、赤色露光シアン現像の順におこない、定着してコピーを得る。デジタル画像処理により色が可能になっている。現在は1転写ドラム4トナー方式や（もう一つのトナーは黒）、4転写ドラムを並べたタンデム式がある。

インクジェットプリンター 以下に静電気を利用した各方式の印字原理の概要を示す。1) 荷電量制御形：インクに $2\sim 3\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力を加え、超音波振動しているノズルからジェットを噴出してインクを粒子化し、その飛行粒子に与える電荷量を制御し、一手の電界中を通過させることで、偏向させ、印字する。2) Hertz形：1)と同様に噴出させて粒子化するが、制御電極で高電圧をかけるとインクがスプレー状になって紙まで届かなくなるので、インク粒子の量を制限することで印字する。曲げないし、かけるのは線分なので走査必要。3) 電界制御系：ほぼ一定電荷を持つインク小滴をノズル先端から静電引力により噴出させて、途中に設けられたXおよびY偏向板により偏光させ、文字を形成する方法。
小ノズルから多数ノズルに変わるに連れインクはon/off制御に変わった。結果として静電気制御は不要になったらしい。

画像表示装置 DMDとかプラズマとか液晶とか。もう疲れました。

3.3 静電気応用技術（それ以外）

静電塗装 静電塗装は、エアスプレーガンやエアレス塗装法、もしくは静電霧化現象を用いて微粒化し、この微粒化した塗料の粒子に電荷を与え、被塗物に繁体の電荷を与えておいて、塗料を静電的に被塗物に付着される方法である。環境問題のために、有機溶媒や酸を避けようとエアスプレーガン以外を採用する傾向にある。塗料が裏まで回り込む、付着力が大きい等の特徴がある。より塗装の無公害かが要望される現在、静電粉体塗装の伸びが著しい。

静電散布 静電散布は、液体微粒子（農薬）、粉体（粉末農薬）などを静電的に散布する。原理は基本的に静電塗装、静電粉体塗装と変わらない。静電塗装ほど積極的に利用されない理由として、産業利用なら装置1台であげうる利益が大きい、農作物だとそれほど大きくないから、コストパフォーマンス的に。

静電植毛 静電植毛は、高圧静電界に置ける静電吸引力を利用するもので、あらかじめ接着剤を塗布した機材に短繊維（パイル）を垂直に植え付け、その根元を固定する加工である。

メリットとしては、1) 植毛方向が一定で直立している、2) 密集度よく、緻密に仕上がる、3) 堅牢度よく、摩擦に強い、4) 生産能率が良いなど。広範な応用例を持ち、目覚ましい発展を見せているような。

静電紡績 強さの一定でない電場内では、繊維はその長さによって異なる挙動をするので、長・短繊維群から短繊維を分離除去できる。また、同種の電荷を帯びた繊維束中の書く繊維が反発して広がるのを利用し、仮よりをかけて糸にすることができる。紡績に用いる比較的長い繊維は直立せずに湾曲するので、電気泳動させて平行にまっすぐにし、収束させて糸にすることもできる。

3.4 磁気応用技術（回転機、変圧器等除く）

小野さんの授業でやりました。磁気ヘッド、磁気分離、MRI（核磁気共鳴）、画像化、微小磁界計測など。各技術の説明は各々調べてください。

3.5 誘電体の内部空間電荷の分析方法

1.1の空間電荷分布測定の問題とくっついて出題されます。対応する授業プリントの空間電荷分析方法を参照してください。

3.6 液体の帯電

固体と液体の海面に置いては、熱力学的平衡条件を満足させるように電荷の移動が起こる。すなわち、いずれかの符号の電荷がより多く固体表面に吸着され、他方の電荷が液体内に分布して、平衡状態になる。単純に考えたモデルがヘルムホルツやグイ・チャップマン、シュターンモデルであ

る。これらの電気二重層モデル（たぶん授業ではヘルムホルツを用いてる）を用いて考える。ボルツマン分布を仮定しているので、

$$\frac{d^2\Phi}{dX^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (21)$$

がなりたつ。ヘルムホルツモデルでは電荷が拡散せず配列をなしていると仮定しているので、次の式がなりたつ。

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{2e^2n_0\phi}{\epsilon kT} \quad (22)$$

である。 Φ ：液体内の電位 [V]、 n_0 ：単位体積あたりの分離分子の数。

この式を解くことにより、液体内の電位分布を求めることができる。初期条件 $x=0$ で $\Phi = \Phi_0$ より、

$$\Phi = \Phi_0 \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right) \quad (23)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2e^2n_0}} \quad (24)$$

と解ける。 δ はデバイ長と呼ばれる（配布プリントは間違ってるっぽいですが）。

ここで、アインシュタインの関係式

$$\frac{\mu}{D} = \frac{e}{kT} \quad (25)$$

と、導電率 κ が

$$\kappa = en_+ + en_- \approx 2en_0\mu \quad (26)$$

であらわされることを用いると、デバイ長は、

$$\delta = \sqrt{\frac{\epsilon D}{\kappa}} = \sqrt{\tau D} \quad (27)$$

となる。 τ は緩和時間と呼ばれ、誘電率と導電率より、

$$\tau = \frac{\epsilon}{\kappa} \quad (28)$$

で表される。

このデバイ長は、液体内での電荷の分布を表す目安を与えるものであるが、近似的に考えるならば、電気二重層モデルの二極間のキャパシタの間隔と等価に考えることができる。それゆえ、デバイ長のことを二重層の厚さと呼んでいる。

3.7 流動帯電

液体の帯電のモデルにおいて、電気二重層の一方の電荷が液体の運動とともに運びさらわれる場合、流動電流となる。パイプ内の液体の流れが層流の場合は、流動電流は

$$i_s = \pi d_p \int \rho v dx \quad (29)$$

となる。 d_p : パイプ直径、 ρ : 電荷密度、 x : 管壁からの距離。

もし、二重層がパイプの形に比べて十分小さければ、

$$v = \frac{\tau_0 x}{\eta} \quad (30)$$

である。 τ_0 : 管壁での摩擦応力、 η : 粘性係数

一次元のポアソン分布式 (21) より、流動電流は、ゼータ電位 (2層の電荷による電位差 : $\zeta = \frac{d\sigma}{\epsilon}$) を用いると、

$$i_s = -\frac{\pi d_p \tau_0 \epsilon \zeta}{\eta} \quad (31)$$

と表すことができ、さらに平均流速 \bar{v} で書き直すと、

$$i_s = -8\bar{v}\pi\epsilon\zeta \quad (32)$$

となり、平均流速に比例するが、パイプ径には依存しないという結果が得られる。

層流じゃなくて乱流だったり、層流でも絶縁性液体だったりすると違う式になるが、めんどくさいので説明は省略。レイノルズ数とか定義だけして使ってないし。

3.8 物質の磁化

磁性体に磁界をかけると、電子のスピン電流が力を受け、スピン軸が回転し、磁気モーメントが磁界と同じ (あるいは反対) 方向を向くようになる。磁気モーメントの向きが揃うために磁界の大きさが変わることになるが、この現象を磁性体の磁化という。磁化する際に、磁化ベクトル \mathbf{M} が、

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (33)$$

をほぼ満たす材料を線形材料という。ただ、実際の磁性体の磁化は磁界の変化に対して線形には変化せず、磁界の変化に遅れて磁化が変化する。遅れて変化するために、行きと帰りが異なる曲線上を動くことをヒステリシス現象という。ただ、厳密にはヒステリシスが見られるものの、実用的にはそんなに大きくないため、線形近似して上式を適用することができる。近似した時の χ の値によって材料の名称と特性が異なる。

常磁性体 $\chi > 0$: 磁界をかけるとわずかに磁化するが、磁界をかけるのを止めると元に戻る。

強磁性体 $\chi \gg 0$: 十分に強い磁界をかけると残留磁化が存在するため磁化したままになる。また、強いヒステリシスと、磁気モーメントが移動しきってしまい一定以上の磁化が現れなくなる飽和現象が起こる。

反磁性体 $-1 < \chi < 0$: 磁気モーメントの向きが容易に変わらないために、レンツの法則により電流ループの電流値が外部磁化を打ち消すように働くために材料中の磁界が減少する。

4 出題されていない範囲の解説

出題されていない部分で重要そうなところ、主に配布プリントに数式が記載されているところを解説します。

4.1 同軸円筒のコロナ電流 (2.4.2)

絶縁体表面近傍でコロナ放電を行うと、コロナ電極で発生したイオンが、電極-絶縁体表面間の電界で加速され、絶縁体表面に付着して捕集されることにより、絶縁体が帯電する。円筒電極の中心に放電線をはった同軸円筒電極のコロナ放電について考察する。 ϵ_0 : 真空の誘電率、 μ : イオンの移動度、 V_0 : 放電線の印加電圧、 R : 円筒の半径、 a : 放電線の半径 だとすると、円筒の単位長さあたりのコロナ電流は、

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0\mu V(V - V_0)}{R^2 \ln(R/a)} \quad (34)$$

で表される。

いま、円筒の内面に絶縁体フィルムを一様に張り付けたとすると、フィルム表面はコロナ放電線と同極性に帯電していく。ある時点でのフィルム表面の電位 V_s とすると、フィルム表面に流れ込むコロナ電流 i_s は、

$$i_s = A_s(V - V_s)(V - (V_s + V_0)) \quad (35)$$

$$A_s = \frac{8\pi\epsilon_0\mu}{r^2 \ln(R/a)} \quad (36)$$

となる。フィルムを等しての電荷の漏れを無視すれば、フィルム表面の静電容量を C 、時間を t とし、

$$i_s = C \frac{dV_s}{dt} \quad (37)$$

$$C = \frac{\epsilon_0\epsilon_r}{d} \quad (38)$$

となる。 d : フィルムの厚さ、 ϵ_r : フィルムの比誘電率
以上より、

$$V_s = V \frac{1 - \exp\left(\frac{A_s V_0 t}{C}\right)}{1 - \frac{V}{V-V_0} \exp\left(\frac{A_s V_0 t}{C}\right)} \quad (39)$$

が得られる。

電子写真に使われるような一般のコロナ帯電装置では、 A_s を実験的に決定する。

帯電過程で試料フィルムを通じて電荷の漏れがある時は、漏れ電流を i_l とすると、フィルム表面を帯電させる有効コロナ電流 i_e は、

$$i_e = i_a - i_l \quad (40)$$

となる。

4.2 コロナ荷電

電気集塵、粉体静電塗装に代表される粒子の荷電には、主として、コロナ放電が利用されている。荷電機構はコロナ放電によって作り出されたイオンが、電界によって加速されて粒子表面に衝突し、表面に捕捉されるものと、イオンの熱運動による拡散で粒子表面にとらえられるものの2種類に分けられる。

4.2.1 電界による荷電 (2.4.3)

球状粒子が均一電荷分布で電荷 Q をもち、均一電界 E_0 の中に置かれているとすると、粒子まわりの電場 $E_g(r, \theta)$ は、

$$E_g = -\frac{\partial V}{\partial r} = E_0 \cos\theta \left(2 \left(\frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} \right) \frac{a^3}{r^3} + 1 \right) + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} (r \geq a) \quad (41)$$

ここで、 ϵ_s : 粒子の比誘電率、 a : 粒子の半径である。

粒子に近づく電荷 q のイオンは、 $F = qE_g$ なる力で粒子表面に引かれ、 $F = 0$ 都となるときの粒子の荷電は終了する。粒子の最大帯電量 Q_{max} は、

$$Q_{max} = 4\pi\epsilon_0 p a^2 E_0 \quad (42)$$

$$P = \frac{3\epsilon_s}{\epsilon_s + 2} (\text{誘電体粒子}) \quad (43)$$

である。粒子の帯電の時間依存は、

$$Q = Q_{max} \frac{t}{t + \tau} \quad (44)$$

$$\tau = \frac{4\epsilon_0}{N_0 q b} \quad (45)$$

となる。上記は $2\mu\text{m}$ でよくあう。粒子半径が $1\mu\text{m}$ 以下の場合には以下の拡散荷電が支配的になる。

4.2.2 イオンの熱拡散による荷電 (2.4.4)

ポテンシャル場 $U(r)$ (r は場内の位置を表す) 内のイオン密度は N は、分子運動論から、

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{U(r)}{kT_A}\right) \quad (46)$$

出表される。 N_0 : $U = 0$ でのイオン密度、 k : ボルツマン定数、 T_A : 絶対温度。

均一に帯電した球状粒子の近くでの電荷 q をもったイオンのポテンシャルエネルギー U は、

$$U = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (47)$$

となる。 Q : 粒子の帯電量、 r : 粒子の中心からイオンまでの距離。

イオンと半径 a の粒子が衝突する時間間隔 t は、

$$t = \frac{1}{\pi a^2 N \bar{v}_i} \quad (48)$$

である。 \bar{v}_i : イオンの平均速度

もし、粒子に衝突するすべてのイオンが影像力で粒子に付着するとすれば、

$$\frac{dQ}{dt} = \pi a^2 N e \bar{v}_i \quad (49)$$

$$Q = \frac{4\pi\epsilon_0 a k T_A}{e} \ln\left(\frac{a N_0 q^2 \bar{v}_i}{4\epsilon_0 k T_A} t + 1\right) \quad (50)$$

となる。

4.3 静電気力の応用

4.3.1 静電気力

クーロン力のこと。説明は割愛。注意すべき点は、実在の電荷は点電荷ではなく、大きさを持っていて、その結果後に述べるグレーディエント力の作用でクーロンの法則は成り立たなくなること、また、電子の半径に比べて接近し過ぎると、影像力によってやはりクーロンの法則は成り立たなくなることである。

4.3.2 影像力

影像法でえられるやつ。影像法は電気磁気参照。

4.4 分極力

外部電界中に存在する物体は導体でも誘電体でも分極し、分極電化を生じる。その結果、帯電していない物体でも種々の分極力が作用する。以下に分極力の詳細を述べる。

4.4.1 配向力

物体の形状が回転対称でない場合に、分極して現れた電気双極子モーメントを電界の方向に配向させるように働く静電力。電界が平等電界でも不平等電界でも発作用するが、平等電界の場合は配向が終わると電界は0になる。だから静電遮蔽が起こるわけ。詳しくは電気磁気で。

4.4.2 グレーディエント力

電界が場所的に不平等な場合、分極電荷とこの不平等電界の相互作用の結果生ずるもので、素の結果物体には電界の強い場所に吸引しようとする力が作用する。この分極力は電界強度自体に勾配がある結果生ずるので、グレーディエント力と呼ばれる。一般にグレーディエント力は次のように表される。

$$\mathbf{F} = \left(\frac{v\alpha}{2} \text{grad} E_e^2 \right) \quad (51)$$

v : 物体の容積、 E_e : 物体の場所に置ける外部電界強度。

物体が比誘電率 ϵ_e の球の場合、上式は次のように表される。

$$2\pi a^3 = \frac{\epsilon_s - 2}{\epsilon_s + 2} \epsilon_0 \epsilon_m \text{grad} E_c^2 \quad (52)$$

ϵ_m : 媒質の比誘電率。

すなわち、 \mathbf{F} は電界の方向に関係なく、また交流電界と直流電界とを問わず、 E_e^2 の大きくなる方向に作用し、その大きさはその場所のエネルギー密度 $(1/2)E_e^2$ の勾配球の体積に比例する。

4.4.3 数珠玉形成力

分極した物体同士の間働く相互作用の結果、数珠玉を形成させようとする作用力のこと。一旦数珠玉が形成されると導体同士はクーロン力により引き離されるが、誘電体の場合には分極電荷同士の員力で数珠玉状態を保つ。形成過程は複雑なので割愛。

4.4.4 ジョンソン・ラーベック力

接触する物体に電流を長すと、接触点をはさんで接触抵抗のために局部的に大きな電位降下を生じる。すると接触点の両側の極めて小さな間隙をへだてて相対向する面（一種のコンデンサを形成している）に、正負の電荷がたまって間隙に著しく大きい電界を生じ、その結果マクスウェルのひずみ力を生じるため、大きな吸引力を生じる。この効果をジョンソン・ラーベック力という。

4.4.5 空間電荷に働くクーロン力

外部電界中に空間電荷が存在する場合には、ある点の電界を $\mathbf{E}[V/m]$ 、空間電荷密度を $\rho[C/m^2]$ とすると、その点に単位容積あたり

$$\mathbf{F} = \rho \mathbf{E} [N/m^3] \quad (53)$$

の力密度のクーロン力が働く。

4.5 帯電粒子の動力学的現象

真空中での直流電界は頻出 3 題で解いたのでそっちを参照されたい。

あとはテストに出せそうな交流平等電界中の帯電粒子の運動を、簡単に解説しよう。

講義プリント (3.2.9) を解くと、(3.2.10~12) が得られる。

水平落下では、水平方向 (x 方向) に交流電界を形成し、上方から帯電粒子を下方に自由落下させる。この場合粒子が小さいとその落下運動には電極間での上昇または下降期流が大きな影響を与える。ここでその y 方向の流速を v_g とすると、y 方向の流速は (3.2.13) になる。これを解くと (3.2.14) が得られ、相対落下速度: $v = v_y - v_g$ として (3.2.11) に代入すると、(3.2.15) が得られる。したがって、 v_g 、 v_y 、 A を測定すれば (3.2.15) から q/m を求めることができる (この 3 つは測定可能)。また、それより相対落下速度 $v = v_y - v_g$ が得られると、

$$v = v_y - v_g = \frac{mg}{6\pi\eta a} \quad (54)$$

を変形して (3.2.16) が得られる。これより粒子のストークス半径が得られ、 m 、 q を得ることができる。

あとは出ないでしょう。やりたい人は頑張ってください。

5 小野先生の担当分総括

電磁気やっただけのなのでやはり特に解説しません。抑えておくべきポイントだけ記して終わりにしたいと思います。

出題されそうなので抑えておくべきなのは、

- 磁性体ネタ。過去問にもありました。前述の解答が少しは参考になるかと。各磁性体の特徴、ヒステリシス、キュリー温度など。
- グレーディエント力。電気双極子は説明しましたが、磁気モーメントでもあります。
- マクスウェルの応力。静電気力の応用とからめて出せたりします。
- (磁束の拡散方程式)
- (表皮効果)
- (ベクトルポテンシャル)

- (電磁場の持つエネルギー)

ほんと電気磁気ばかりですね。この際なのでテストまでに復習しましょう。

あとは過去問にもあった磁気応用技術。いい資料がないので適当にググって答えを準備してください。

この稚拙なシケプリを最後まで見てくださった皆さんに単位が降ってくることを願わんばかりです。