

磁性 I

－ 磁場と磁性の基本 －

問

5

次の中から、磁石にくっつくものを選びなさい。

机(木)	1円玉(アルミニウム)	10円玉(銅)
消しゴム(プラスチック)	クリップ(鉄)	

磁場の中に置くと、自身も磁石になる物質を「強磁性体」という。強磁性体は外部から磁場をなくしても、磁化している (永久磁石)

→ 単体で強磁性を示す金属元素は？：

一方、永久磁石以外のどんな物質でも、外部磁場に反応する磁性を帯びている。常磁性体 (外部磁場の方向に磁化)、反磁性体 (外部磁場と逆方向に磁化) などである。

常時性と反磁性の例

6

常磁性

酸素が身の回りにある代表的な常磁性体である。

中身を酸素だけにしたシャボン玉に、磁石を近づけると・・・？

反磁性

水が身の回りにある代表的な反磁性体である。

ミニトマトに磁石を近づけると・・・？

なぜそうなるか、これは量子力学を使わないと理解できない。

大学で学ぼう！

電磁場の基本量

7

電磁場には、4つの基本量がある。この内、高校物理(というか真空中の電磁気学)に必要な量は電場 E と磁束密度 B の2つだけである。

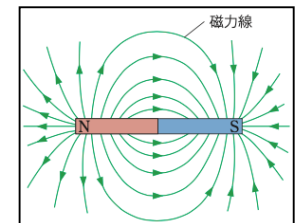
$$\text{電場 } E \quad \text{電束密度 } D = \epsilon_0 E + P$$

(ϵ_0 : 真空の誘電率 P : 分極)

$$\text{磁場 } H \quad \text{磁束密度 } B = \mu_0 H + M$$

(μ_0 : 真空の透磁率 M : 磁化)

真空中では、 P も M もゼロであるので、 E と D , H と B はただの比例した量であり、区別する意味がない。都合が良いように、電気の量は電場 E , 磁気量は磁束密度 B だけを用いて授業を展開する。勝田は B のことを普通に「磁場」とか呼んじゃうので、気にしないように。

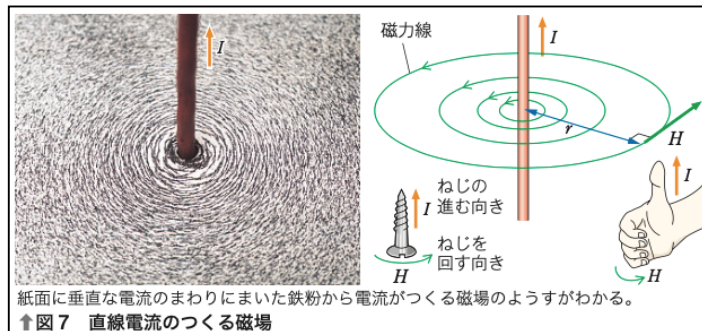


磁性 II

－ 電流の周りに広がる磁場 －

Note : 直線電流の周りの磁場

中学校で既に学んだように、直線電流の周りには円形の磁場が生じる。その向きはちょうど、電流が右ねじの進む向き、磁場が右ねじを回す向きに対応している。右ねじとか言わないで右手でイイネ!した方がイイネ!



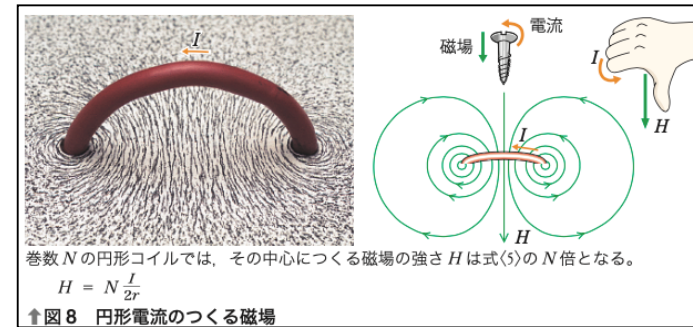
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

r [m]: 電流からの距離

↑図7 直線電流のつくる磁場

Note : 円形電流の作る磁場

中学校で既に学んだように、電流が円形に流れているとき、それを貫くように磁界ができる。その向きはちょうど、磁界が右ねじの進む向き、電流が右ねじを回す向きに対応している。イイネ!! イイネ!!



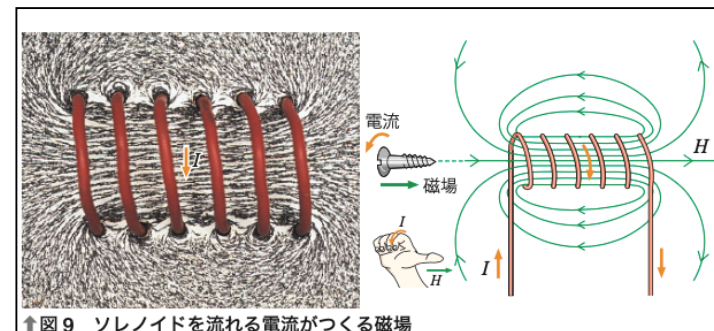
$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}$$

r [m]: 円形電流の半径

巻数 N の円形コイルでは、その中心につくる磁場の強さ H は式(5)の N 倍となる。
 $H = N \frac{I}{2r}$
 ↑図8 円形電流のつくる磁場

Note : ソレノイドコイルの作る磁場

導線を筒状にぐるぐる巻いて、円形電流をたくさん並べたものをソレノイドコイルという。ソレノイドコイルの内部では、磁場が筒内をまっすぐ貫き、どこでも強さは一定である。



$$B = \mu_0 n I$$

n [m]: 単位長さあたりのコイルの巻き数

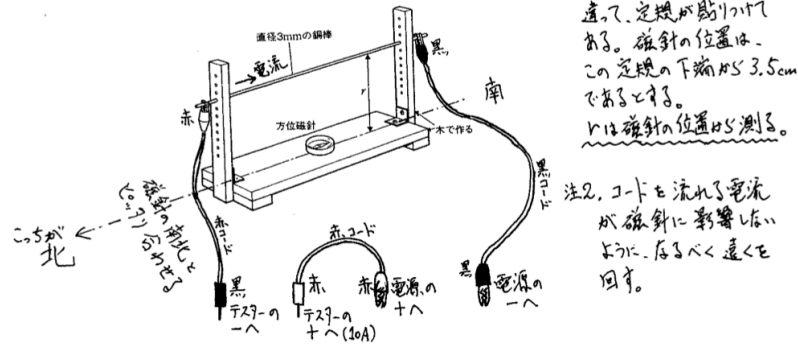
↑図9 ソレノイドを流れる電流が作る磁場

実験：直線電流の周りに広がる磁場の測定

■ 直線電流がつくる磁場は、

- ① 電流の大きさとどんな関係があるか。
- ② 導線との距離とどんな関係があるか。

調べる。



- ※ 実験の前に、方位自信で机の上を探って、裏側に鉄製のものや磁石がないか確認
- ※ 装置を、**正確に南北方向に固定**せよ。正確に合わせて、養生テープで装置を机に固定。
- ※ 図右の手書きの注意事項をよく読むこと。

記録欄

電流 I [A]	r = 6.0 cm (1/r = /cm)		r = 8.0 cm (1/r = /cm)		r = 10 cm (1/r = /cm)		r = 12 cm (1/r = /cm)	
	磁針の振れ角 θ [°]	tan θ	磁針の振れ角 θ [°]	tan θ	磁針の振れ角 θ [°]	tan θ	磁針の振れ角 θ [°]	tan θ
1.0								
2.0								
3.0								
4.0								
5.0								

課題1 (兼 事後課題：必須)

- (1) 縦軸 tan θ - 横軸 I のグラフを 4 本重ねて描け (写真を提出)
- (2) 縦軸 tan θ - 横軸 $\frac{1}{r}$ のグラフを 5 本重ねて描け (写真を提出)
- (3) 何のために tan θ の値を求めているのか説明せよ。
- (4) それぞれのグラフからわかることを述べよ。

課題2

(1) この実験結果と、 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ の関係から、地磁気の水平成分を求めよ。

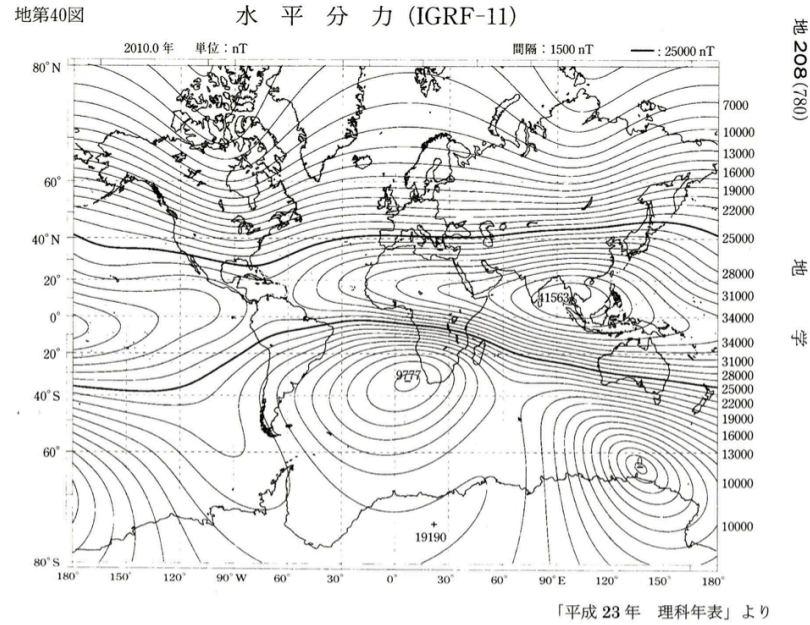
なお、磁場 (磁束密度) B の単位は、T(テスラ)である。

また、真空の透磁率は $\mu_0 = 1.25663706212 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$ である。

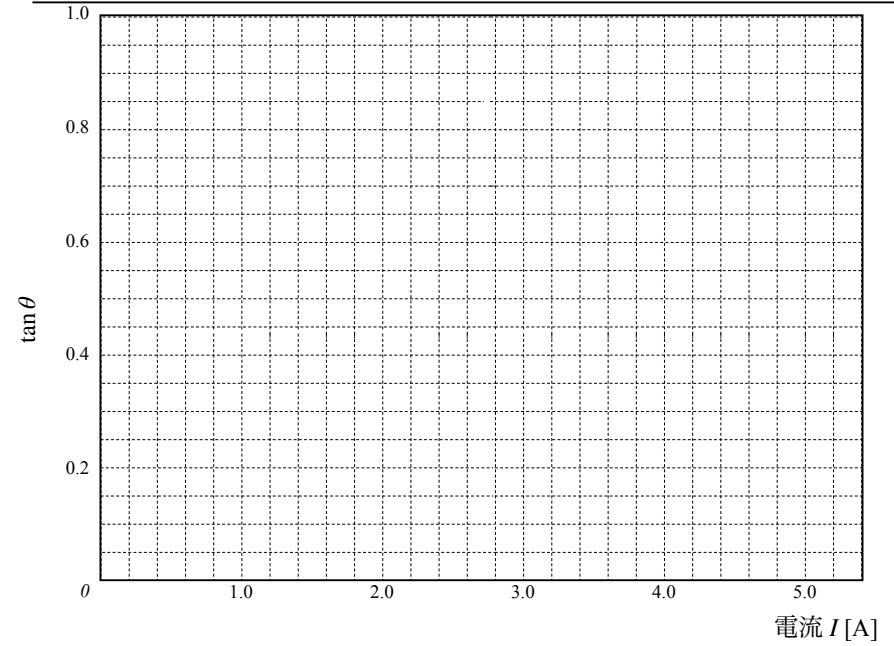
(2) (1)で求めた値と、次頁の参考資料の値を比較せよ。

※ この実験の精度では、オーダーがあてれば十分。

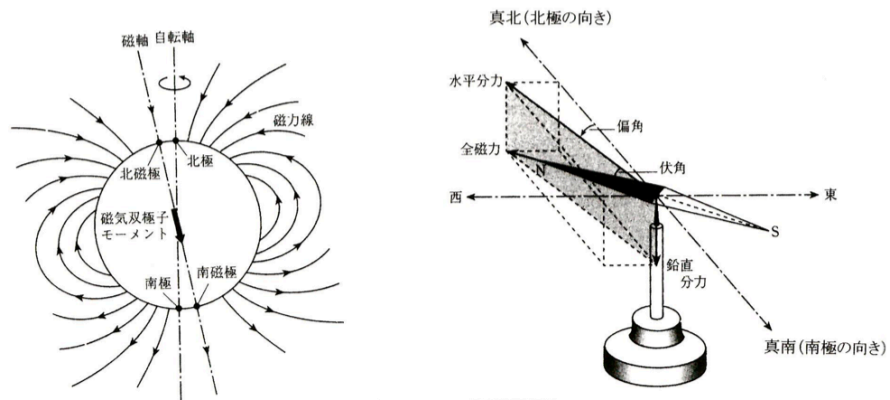
参考資料 1



課題 1 (1)

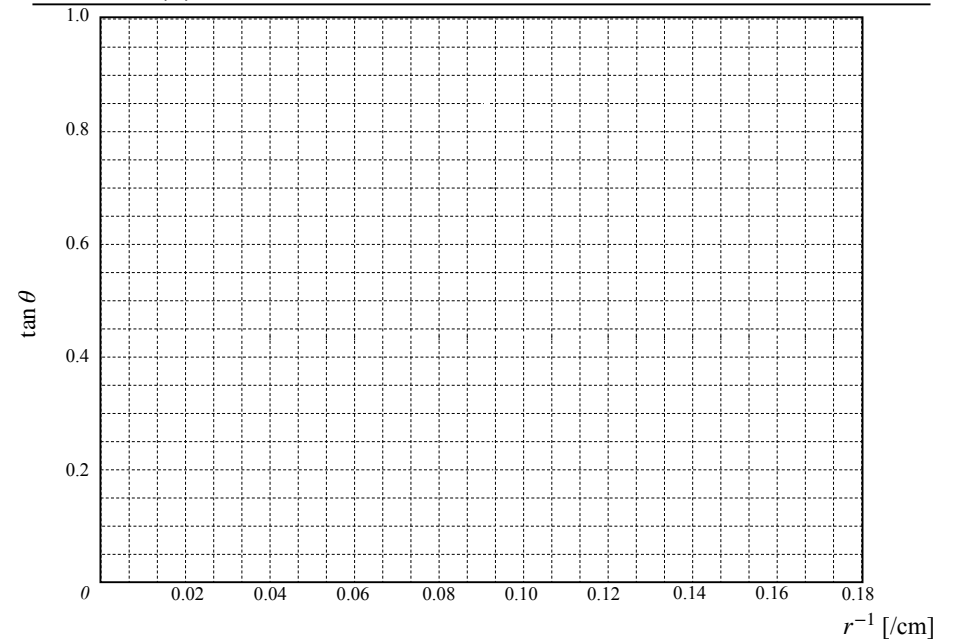


参考資料 2



* 方角を知るために使うふつうの方位磁針は、磁針が水平になるようにバランスをとるおもりが付けてある。

課題 1 (2)



第1回事後課題 (Google Classroom から回答)

20

【必須の課題】

- ・今日の授業内容で、大切なことは何だったか、まとめて下さい。
- ・実験課題1, 2に回答せよ。

Note : 電流が磁場から受ける力

26

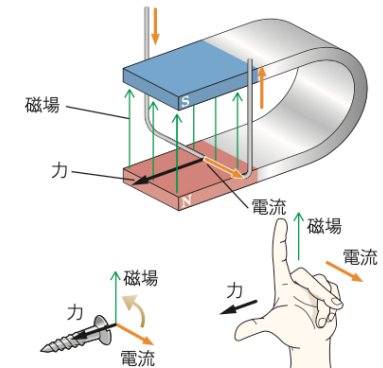
中学校で既に学んだように、磁場に対して垂直に流れる電流は、磁場から力を受ける。この向きはちょうど、左手の中指が電流、人差し指が磁場、親指が力に対応する。左手だからね、左手。

磁場 (磁束密度) B の単位 [T] は、

磁場に垂直な 1 A の電流が流れる導線が、単位長さあたりに受ける力 [N/A・m] で定義される。

つまり、長さ L の導線に、電流 I が流れているとき、磁場 B から受ける力 F は：

$F = IBL$ と表される。



↑ 図 10 電流が磁場から受ける力

※ 電流と磁場が垂直でないときは、分解する。

高3物理 2022 (勝田)

22

磁性 III

— 電流が磁場から受ける力 —

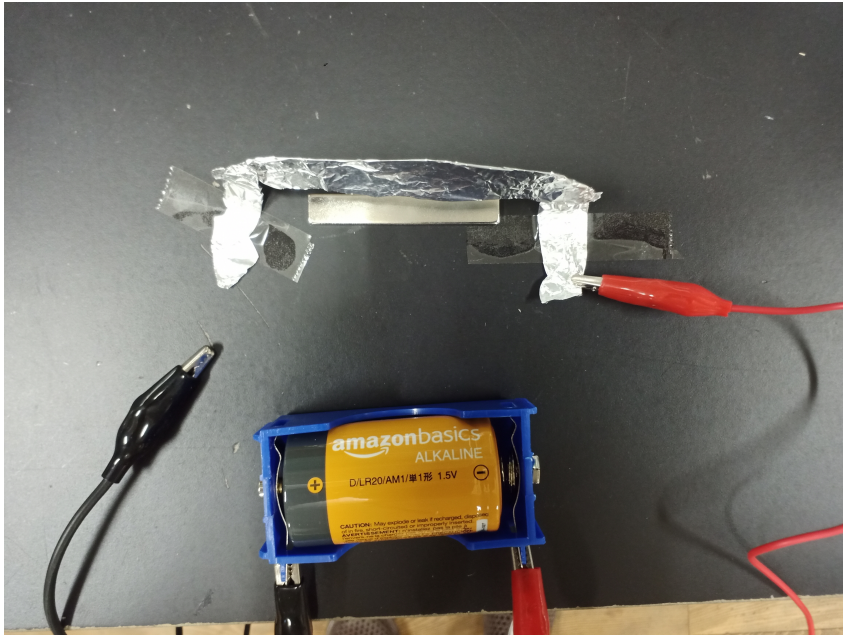
実験

27

- ・アルミホイルを導線にして、力の向きを確かめよう。
 - ・アルミホイル
 - ・磁石 (向きを逆にするのもやる)
 - ・乾電池 (向きを逆にするのもやる)
- ・結果を記録しておこう。

装置外観 1

28

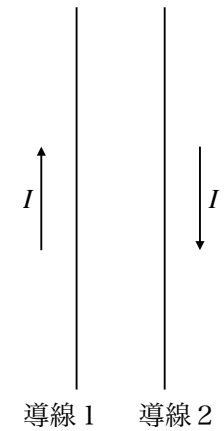


課題

30

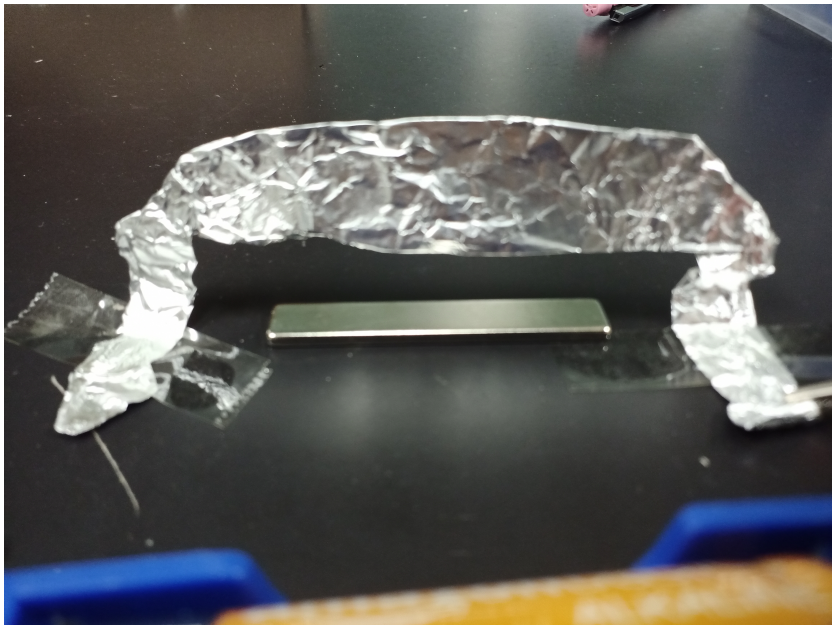
2本の導線に、逆向きに電流が流れている。
このとき、導線1にはたらく力は、どの向き
だろうか？

- ゲー) 左向き
- チョキ) 右向き
- パー) 紙面を表から裏に貫く向き
- バンザイ) 紙面を裏から表に貫く向き
- オケ) 力ははたらかない



装置外観 2

29



31

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

Note : ローレンツ力

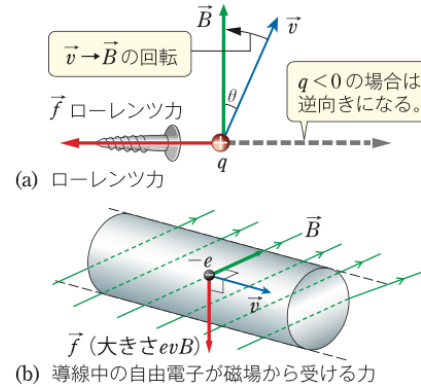
32

ローレンツ力は電流が受ける力をマクロな立場で解析しているが、ミクロに見ると、運動する電荷が磁場から受ける力と解釈することができる。この力を、「ローレンツ力」と呼ぶ。

磁場 B の中を、電気量 q の電荷が速度 v で運動しているとき、ローレンツ力の大きさ f は:

$$f = qvB \text{ と表される。}$$

これを電流を構成する電荷すべてについて足し合わせたものが、電流が磁場から受ける力である。

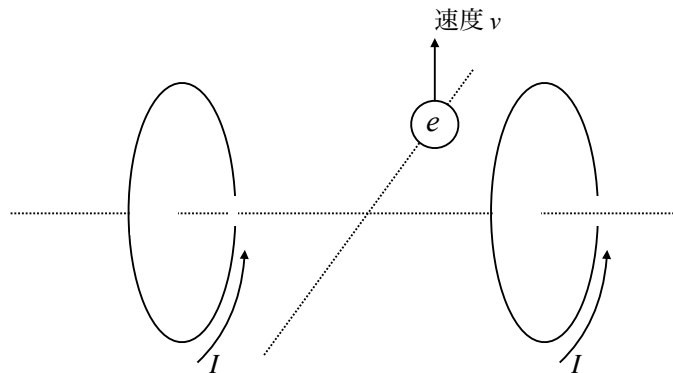


課題

33

2つの円形コイルを平行に並べて、同じ向きの電流を流す。

その間空間に、電子を（短い空間を電場で加速させて）速度 v で、コイルと平行に発射すると、どのような運動をするだろうか？



34

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

結果

なぜそうなるのか、どう考えるべきだったか、自分の言葉でまとめよう。

観察 & 課題

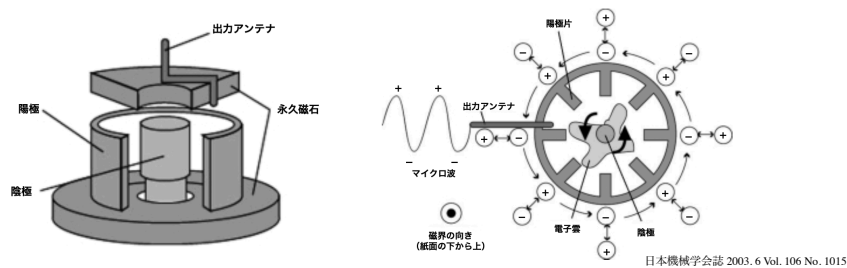
35

- (1) さらに磁場をどんどん強くしていくと、コイルの間の空間に、電子が閉じ込められるようになる。観察せよ。
- (2) 電子の質量を m , 電気量を e として、円の半径を求めよ。
- (3) この円運動の周期を求めよ。

観察 & 課題

36

(4) これを原理とした、身近な電化製品は何だろうか？



高3物理 2022 (勝田)

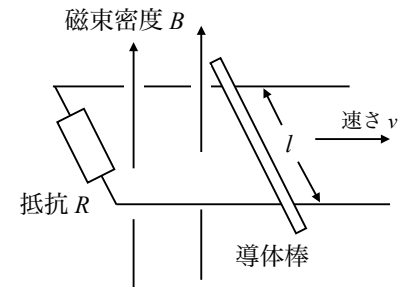
39

磁性 IV

－ 磁束変化の相対性 －

課題

40



上向きで一様な磁束密度 B の空間に対して垂直な水平面に左図のような回路を組んだ。导体棒は、回路に接触したまま一定の速さ v で右向きに動いている。

また、导体棒の（導線に挟まれた部分の）長さは l である。

(1) 导体棒には起電力が生じる。どうしてか説明せよ。

課題

41

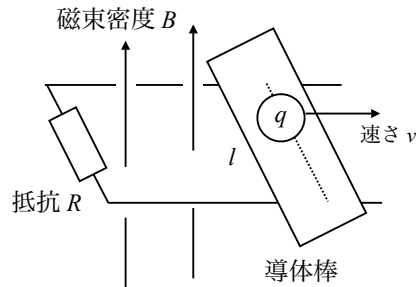
(2) 起電力の大きさを求めよ。

(3) これを、「コイルの面積 $S(t)$ 」に注目した変形せよ。

Note：ローレンツ力と電磁誘導

42

先の導体棒の内部で電荷 $+q$ [C] がされる仕事を考えよう。

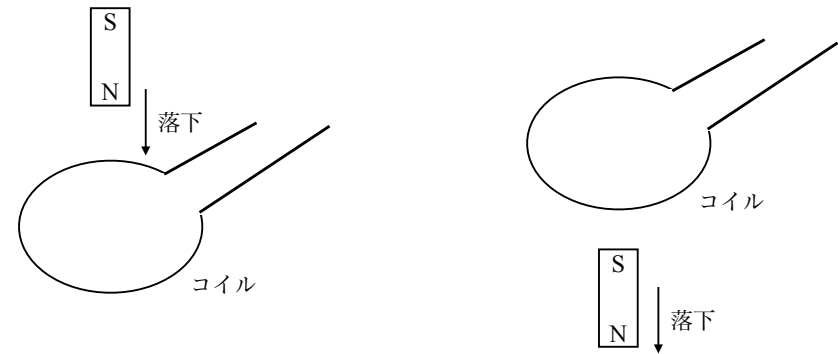


磁場 B に面積 S をかけたものを磁束 $\Phi(t) = B \times S(t)$ と定義する。
電磁誘導による誘導起電力 V は、単位時間あたりの磁束の変化として、

$$V(t) = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \text{ と書ける。}$$

Note：電磁誘導

44

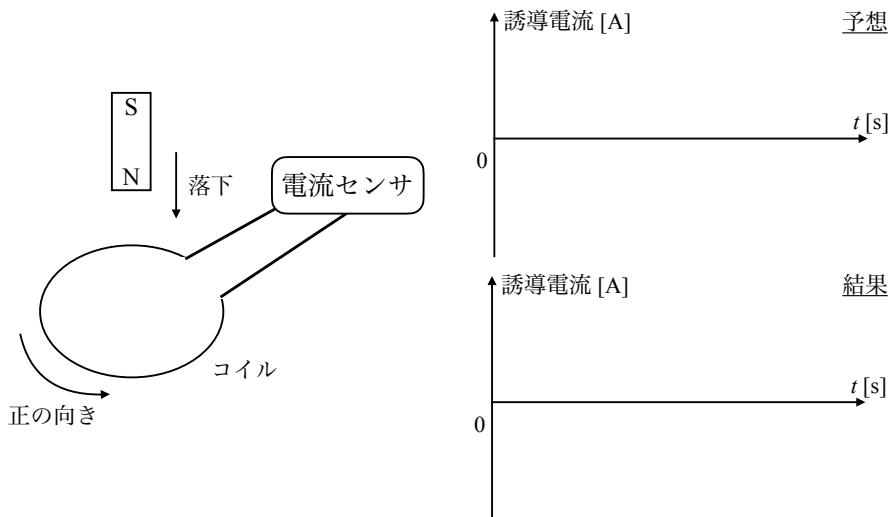


- ※ コイルを貫く磁束の変化を打ち消す向きに、誘導電流が流れる。
- ※ その電流を流すような、誘導起電力がコイルに生じる。

課題（中学校の復習）

43

図のように、棒磁石をコイルの中に落下させる。コイルに生じる誘導電流と時間の関係を表すグラフを描け。



すごく不思議な磁束と誘導起電力の関係

45

先に学んだ通り、磁場 B に面積 S をかけたものを磁束 $\Phi(t) = B \times S(t)$ と定義する。電磁誘導による誘導起電力 V は、単位時間あたりの磁束の変化として、

$$V(t) = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \text{ と書ける。}$$

すごく、不思議なのだけれど、コイルの面積ではなく、磁場 $B(t)$ の方が変化しても、同じ法則としてまとめられる。 $V(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -\frac{d(BS)}{dt}$

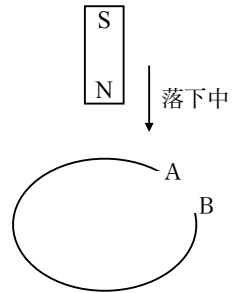
この場合、起電力となる仕事をするのは、ローレンツ力ではない。では何故、まったく同じ方程式で起電力が表されるのか？ある電磁気学の教科書には、「それがどうしてなのか、誰も知らない」とある。

電磁気学に Einstein の相対性理論を持ち込むと説明できるよ!!

問

47

下図の瞬間において、電位はAとB、どちらが高いだろうか。理由も！！



自分の考え

A · B

結論

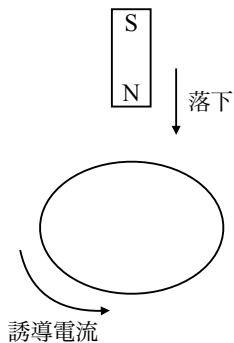
A · B

課題

48

これだったら？

(1) コイルに誘導起電力は生じるか？

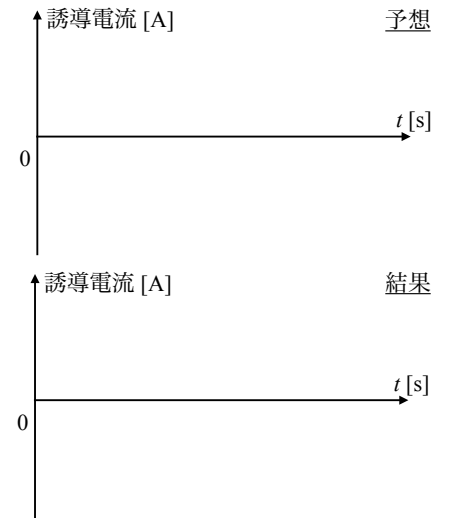
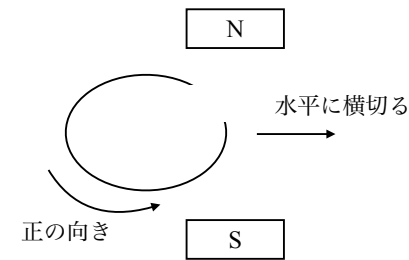


(2) コイルに電位差はあるか？

課題（時間があれば）

49

図のように、コイルがU型磁石の中を水平に横切る。コイルに生じる誘導電流と時間の関係を表すグラフを描け。



第2回事後課題（Google Classroom から回答）

50

【必須の課題】

・今日の授業内容で、大切なことは何だったか、まとめて下さい。

【任意の課題】

(1) 電子レンジで使用される電波は 2.45 GHz と国際規格で定められている。また、伝播速度は 3.0×10^8 m/s である。波長はどれくらいか？

(2) 電子レンジの電波は、食品中の水分子を振動させることにより温めるので、人体に照射されると大変危険である。どのようにして、電子レンジの電波が、レンジの外に出てこないようにしているのか？

(3) 磁石の中でコイルを回転させると、何が起こるだろうか？

磁性 V

－ 電磁誘導を場で捉え直す －

どうしてコイルが特別扱いされるのか？

57

前回、Faraday の電磁誘導の法則を扱った。

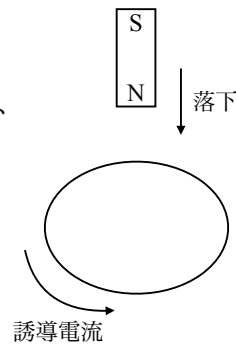
磁場 B に面積 S をかけて磁束 $\Phi(t) = B \times S(t)$ を定義、
誘導起電力 V は、コイルを貫く磁束の時間変化として、

$$V(t) = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \text{ と表された。}$$

この実験では、磁石とコイルが登場する。
磁石は、磁場を生じていればなんでも良い。
電磁石でも、地磁気でも構わない。

一方で、コイルは、なぜコイルでなければならないのだろうか？
ただの直線の導線とか、導体板では、電磁誘導は起こらないのか？

あるいは真空中で、磁石を揺さぶっても、何も起こらないのだろうか？



実験

58

机の上に、硬貨を立てる。頑張っ立てろ。 (うまく立たないことに思い当たる理由があるなら、寄付をください)

(1) 硬貨スレスレに磁石を持っていき、急に引き離す。何が起きた？



結果

(2) 磁石の向きを逆にして、(1)と同じ実験をすると？

予想

結果

(3) 磁石を、硬貨に急激に近づけて止めると何が起こるか？

予想

結果

課題

59

実験 (1), (3) を考えよう。

班で話し合い、何が起きたのか、どうしてこのような結果になったのか、書いてみよう。

Note : 誘導電場と渦電流

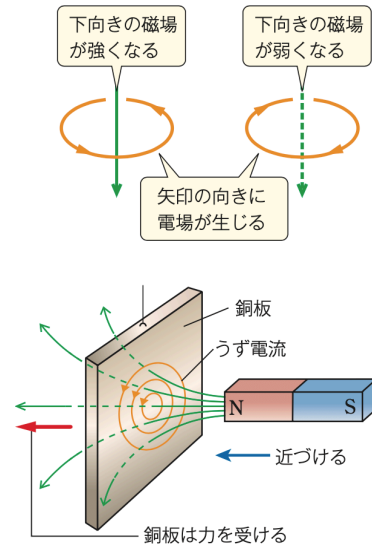
60

電磁誘導を、コイルと磁束の関係からもう1歩踏み込んで、電場と磁場の関係でとらえ直してみよう。

空間中で磁場が変化するとき、右ネジの法則に従うような、電場が誘導される。

その空間に、“たまたま” 導体があると、電荷が力を受けて、電流が流れる。コイルであれば、導線に沿って電流が流れるだろうし、導体板であれば、渦状の電流（渦電流）が生じるだろう。

この渦電流を作る誘導電場には、始点や終点のような位置関係がないので、導体に電位差も生じない。

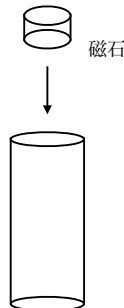


課題

61

ネオジウム磁石を、アルミパイプの中に落下させる。
自由落下のときと比べて、落下速度はどうなるだろうか？

- グー) 速くなる
- チョキ) 変わらない
- パー) 遅くなる

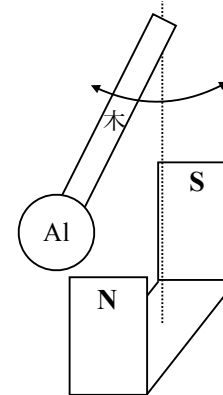


自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

実験

64



木の板にアルミ板を取り付けた振り子を、磁石の間を通るように設置する。振り子を振動させるとどうなるか。

自分の予想

予想の理由を自分の言葉で説明せよ。

結果

どう考えれば良いだろうか

(1) 振り子の力学的エネルギーは、どこに行ってしまったのだろうか？

(2) どんな実験を行えば、(1)の考察が検証できるだろうか？

(3) この実験と同じ仕組みは、電磁ブレーキとして電車などに利用されている。どんなメリットがあるだろうか？

磁性 VI

－電磁波－

誘導電場と誘導磁場の行方は？

前項において、次のことを学んだ。

- ・空間中で磁場が変化すると、誘導電場が生じる

また、電磁場の相対性から、次のこともわかっている。

- ・空間中で電場が変化すると、誘導磁場が生じる

今、空間中のある地点において、磁場が変化したとしよう。

すると誘導電場が生じる。と、いうことは、その空間に電場の変化が生じたということだから、誘導磁場が生じるはずである。ってことは磁場が変化したのだから・・・

堂々巡りで電場と磁場が常に誘導されていく。これはどういう現象なのだろうか？

電磁場の基本量 (復習)

磁場の第1回で、電磁場には4つの基本量があり、高校物理(というか真空中の電磁気学)に必要な量は電場 E と磁束密度 B の2つだけである、ということ学んだ。

$$\text{電場 } E \qquad \text{電束密度 } D = \epsilon_0 E + P$$

(ϵ_0 : 真空の誘電率 P : 分極)

$$\text{磁場 } H \qquad \text{磁束密度 } B = \mu_0 H + M$$

(μ_0 : 真空の透磁率 M : 磁化)

さらに電磁場の基礎方程式 (Maxwell 方程式) は、以下のようになる。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \qquad \nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + j \qquad \nabla \cdot D = \rho$$

真空中の Maxwell 方程式から導かれる結論

69

先の Maxwell 方程式を、真空中の条件下で頑張って(笑) 計算すると：

$$\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) E$$

$$\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} B = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) B$$

となる。

ちなみに、媒質中を伝播速度 v で伝わる波動の方程式は：

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) f$$

である。

電磁波の伝播速度を求めよう

70

とりあえず、電磁場 E, B が満たしている方程式は、波の方程式と同じ形をしている。真空中を波が伝わるのだろうか？という疑問が残るが、とりあえず、波の伝播速度（伝わる速さ）を求めてみよう。

課題：電場と磁場の波の伝播速度を求めよ。

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C / Nm}^2 \quad \mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

電磁波

71

結局のところ、次のようにまとめられる。

- ・空間中で電場の変化は磁場を生じ、磁場の変化は電場を生じる。
- ・それは波として空間中を伝わっていく（電波と磁波は必ずセット）
- ・真空という何もないところで、媒質がないのに波が伝わる
- ・真空には性質がある
- ・その伝播速度は光の速さ $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ に等しい。

そして、Maxwell は次のように考えた：

－光って電磁波なんじゃね？

その後、実験的にも電磁波の確認がなされ、光は電磁波の一種であると、結論づけられた。どの電磁波も、真空中で伝播速度は共通である。

電磁波の実験

72

- ・電磁波の発信機と受信機を用意。
- ・電磁波を受信すると、音が鳴る仕組み。



光や一般の波と同じ現象が、電磁波でも起こることを確認しよう。

問) 波の、最も波らしい現象といえば？

問) 電磁波は、横波か？縦波か？

光を電磁場としてとらえると

73

光を電磁場として捉えると、幾何光学や波動光学の範囲だけでなく、電磁気学の法則を光に適用して考察することが可能となる。これまで見えてこなかった世界が一気に拓ける。

特に面白いのは、光と物質の相互作用が解析できるようになることだ。電磁波を振動する電磁場ととらえて、物質中の電子に光が当たるとどのような挙動を示すかが解析できる。

例) レイリー散乱 (微粒子中の電子と電波の相互作用)

細かい計算は大学レベルなので割愛するが、波長 λ の光が半径 d の粒子に入射し、角度 θ 方向に散乱されるとき、その強度 I は

$$I \propto \frac{1 + \cos^2 \theta}{\lambda^4} d^6 \text{ となり、これを全方向に積分すると、散乱断面積 } \sigma \text{ も}$$

$$\sigma \propto \frac{d^6}{\lambda^4} \text{ となる。つまり、波長の短い光ほど、散乱されやすい。}$$

青空と夕焼け空

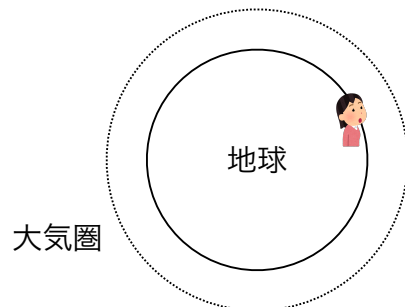
74

レイリー散乱の結果を信じれば、次のことが言える。

- ・波長の長い赤色光は、大気中の粒子によって散乱されにくい
- ・波長の短い青色光は、大気中の粒子によって散乱されやすい

昼間の空は青く、夕焼け空が赤いのも、レイリー散乱で説明がつく。

ヒント：昼間と夕方で、太陽光が大気圏を通過する距離はどちらが長い？



レイリー散乱の実験

76

グルースティック（グルーガンで熱して溶かす接着剤の棒）を、携帯のライトの上に置いて色を観察しよう。

ライトに近い部分と、遠い部分で、強く散乱される光の色が違うはず。



皆既月食

77

2022. 11. 8. に皆既月食が観察された。

月が地球の影にすっぽり入ってしまう。だが、実際には見えなくなるわけではなく、赤い満月となって見える。影に入っているのに見えるのは、地球の大気によって太陽光が屈折するからである。赤く見えるのはどうしてだろうか？



<https://www.nao.ac.jp/gallery/weekly/2018/20180201-lunar-eclipse.html>

第3回事後課題 (Google Classroom から回答)

78

【必須の課題】

- ・今日の授業内容で、大切なことは何だったか、まとめて下さい。

【任意の課題】

IH クッキングヒーターの内部には、大きなコイルが入っている。そこに電流を変化させながら流すことで、調理台上の磁場を変化させている。

- (1) IH クッキングヒーターに、土鍋が使えないのはどうしてか。
- (2) 調理中、鍋は温まるのに調理台を触っても熱くないのはどうしてか。