

千葉方式

電磁気学習の流れ

電磁気学習から相対論へ

1970年代後半から2000年にかけて、科学教育研究協議会(科協教)千葉支部の千葉物理サークルの高校生向けの電磁気・相対論の授業紹介です。この授業のまとめは、朝生邦夫が1980年代後半から2005年にかけて、千葉県立千葉高等学校の全日制および定時制、千葉県立千葉南高等学校全日制での授業で行われた物理授業の内容をその主要な部分をかいつまんで要約したもので構成しました。

科教協の千葉支部機関誌「コロイド」に2020年から約1年間連載された論文をまとめてみました。四半世紀も前の実践ですが、今は先人たちが皆いなくなってしまいましたので、教育現場に日々奮闘されておられるみなさまに、何らかの伝えるべき中身があるなら、汲み取っていただければ さいわい です。

中身は物理初学の高校生にも、また物理以外の理科の先生方にもわかるように、できるだけ易しく書いたつもりですが、どうしても最小限の数式などが出てきてしまいました。

物理をすでに専門的に学ばれた方には物足りないところもあると思いますが、高校生や一般の理科の先生向けの文章です。論文連載中に受けた質問等、若干専門的になった部分は、最後の方に補遺と参考という形で纏めました。

お読みになって、不十分な点をご指摘くださればありがたいと思います。

この授業開発に当たっての指導者・共同研究者に感謝し、
以下に名前を挙げておきます。

林 淳一 稲葉 正 桜井 謙聿 石井 信也 大村 吉郎

石原純 相対論の物理学者

朝 生 邦 夫

元千葉県立高等学校

黷日（あいじつ）荘 石原純と原阿佐緒

私の住んでいる南房総市岩井（旧富山町）は、温暖で風光明媚な土地で、東京の保養地として知られ、たくさんの学園の海の家や海水浴場があります。近くにある道の駅「富楽里とみやま」は、産直野菜や生鮮食品が人気です。岩井の北側には、房総半島を東西に横断する嶺岡山系の尾根が連なっています。それを越えると鋸南町・保田になります。

保田には、国道 127 号線から分かれて鴨川に通じる長狭街道の起点があります。そこから長狭街道を 1km ほど進むと、北側に道の駅「保田小学校」があります。旧保田小学校の校舎をそのまま使った道の駅で、人気になりました。

昔、その北側の丘の上に「黷日（あいじつ）荘」という山荘がありました。物理学者で歌人の石原純が建てたものです。石原は、大正から 昭和（1921 年～1929 年／1941 年～1947 年）にかけて、ここに住んでいました。だから、今でもこの丘を「石原山」とよぶ土地の人がいるそうです。

1921 年（大正 10 年）から 1928 年（昭和 3 年）まで、石原はこの山荘に愛人の原阿佐緒（以下「阿佐緒」といっしょに住んでいました。阿佐緒は、美貌と才能を兼ね備えた女流歌人で、九条武子、柳原白蓮（注 1）とともに日本三閨秀歌人とよばれました。

阿佐緒は、この山荘を「紫花山房」という名前でよんでいました。この丘には、薄紫色の花を咲かせるカタバミ科の園芸植物が植えられています（注 2）。私は、阿佐緒がこのきれいな花を見つけて、紫花山房と名付けたのかな（？）と想像しています。

当時、石原には、妻と 5 人の子がいましたから、1921 年、阿佐緒との恋愛事件によって、東北大学の物理学教授の職を追われることになりました。しかし、世間のバッシングにも負けず、恋愛を貫いたことは、彼の純粋さとロマン主義のなせる、きわめて人間的な生き方ともいえるでしょう。

石原と阿佐緒は、『アララギ』の同人でしたが、恋愛事件を期に、このグループからぬけます。このとき、古泉千樞なども行動を共にしました。古泉は鴨川の出身です。そして、1924 年（大正 13 年）に北原白秋、前田夕暮、釈迢空らによって歌誌『日光』が創刊されると、小泉らとともに、これに参加します。石原は自由律短歌など歌壇の改革も試みています。



黷日荘

現在は建て替えられて別の建物になっている。
（写真は房総史譚から）



紫花山房のサンルームで過ごす石原と原

石原純と原阿佐緒

二人は、7年後に破局を迎えます。阿佐緒は、自身の子どもたちへの情を断ちきれず、1928年（昭和3年）に保田を去り、宮城県にある実家に帰りました。石原も、その翌年には、贅日荘を離れて、住みなれた東京で暮らすようになります。その後、太平洋戦争が始まった1941年からは、再び贅日荘に戻ります。

石原には、弟と妹がいました。弟は謙、妹はつゆといいますが、二人は、石原が別れた妻と復縁できるように仲介したようなのですが、これは実現しませんでした。

阿佐緒には、男の子が2人います。石原といっしょになる前に産んだ子どもたちで、宮城県にある阿佐緒の実家で育てられていました。次男は、俳優として活躍した原保美です。

石原純の業績と思想

石原純は、科学史の上では、相対性理論や近代物理学の諸理論を深め、日本に広く紹介するという科学啓蒙活動に多

大な業績を残しました。自身でも啓蒙書をたくさん書いたほか、アインシュタインとインフェルトの『物理学はいかに創られたか』（注3）の翻訳も行いました。私も高校大学時代にこの本を読みしました。

石原は、長岡半太郎に物理学を学んだ後、1912年（大正元年）から1914年（大正3年）まで、ドイツに留学し、ミュンヘンのゾンマーフェルト、ベルリンのプランク、チューリッヒのアインシュタインのもとで、それぞれ半年間学びました。その後、ロンドン、パリなどをまわって、当時のヨーロッパの一流の物理学の雰囲気を見聞してから帰国しました。

石原は、早くから相対論や量子論を研究し、特にアインシュタインとの直接交流から、彼の説をいち早く日本に紹介しました。当時の理論物理学の最先端を行く科学者の1人でした。1922年（大正11年）、改造社の招聘でアインシュタインが来日すると、彼に同行して講演・講義の通訳、解説をつとめました。

その後、石原は、大学での研究をあきらめ、科学ジャーナリストになりました。子供向けを始めとして、様々な科学啓蒙書を執筆し、理化学辞典の編纂と執筆なども行いました。また、1931年（昭和6年）には、岩波書店が発行する雑誌『科学』の初代編集主任になりました。

石原は贅日荘にいたときに関東大震災に遭遇、灰燼

提供・山崎源治氏



保田停車場通り（現保田駅前商店街）の様子。軒並み家屋が潰れ、この有様であった。大正6年に鉄道が開通し街が賑わう中、だれがこの状況を想像し得たろうか。

に帰した保田の街の様子を書き残しました。この文章を、2007 年（平成 19 年）に前田宣明さんが発見して、「保田震災記」として公表しました（注 4）。

石原は、3.11 にも匹敵する関東大震災の被害状況を的確に記録し、また「朝鮮人虐殺事件」などに絡む根拠のない風評なども科学的に分析し、批判しています。

前田さんは、保田の旅館に勤めながら、地域史を研究しているかたです。私は、最近になって、彼と知り合いました。

石原は、第二次世界大戦中はファシズムに抗し、戦時科学振興政策を批判しました。そのため、軍部や権力からにらまれ、厳しい執筆制限を受けました。それでも、最後まで科学者の科学的精神・合理的精神に基づいて、執筆を続けました。この時期、1930 年代から 40 年代初頭の石原の執筆活動は、科学論、文明論、人生論、恋愛論など、幅広い分野におよびました。そして、敗戦直後の 1945 年（昭和 20 年）9 月、雑誌『科学』の巻頭言に「新しい世界観の建設のために科学者の積極的な協力が要望される」と書き、国内の科学者を励ました。しかし、同年末、占領軍のジープにはねられ重傷を負ってしまい、1947 年（昭和 22 年）、意識が正常に戻らないまま死去したのでした。

彼の死については、何かの組織によって殺されたのではないか（天皇制否定につながる ……（住井すゑ））などの陰謀説もあります。薨日荘で最期を看取ったのは、保田の旅館松音楼の主人昼田昇ご夫妻、石原が東京に出て以来同居していた内縁の堀内耐子、手伝いの大河原よつ子、弟の石原謙、妹の伊藤つゆとその夫、岩波書店専務だったといえます。

石原純は、激動の時代に日本の科学（思想）の発展に多大な貢献をなしとげ、情熱的な人生を送った人物といえるでしょう。

（注 1）長谷川時雨『新編近代美人伝』（岩波文庫）の下巻に、九条武子と柳原白蓮の評伝が載っている。柳原白蓮は、NHK の連続テレビ小説「花子とアン」の主人公である村岡花子（『赤毛のアン』の翻訳者）の生涯の親友であったので、このドラマにも登場する。

なお、「花子とアン」は、現在、平日の午後 4 時 20 分から NHK 総合で再放送中である。（2021 年 3 月時点）

（注 2）オキザリス・トライアンギュラス。小葉が下の写真のように三角形であることから、サンカクバカタバミという和名がつけられているが、学名でよばれることのほうが多い。

（注 3）岩波新書。上下 2 巻。版を新しくして、読みやすくなったものが、現在も出ている。

（注 4）「理科ハウス」という名前の「世界一小さな科学館」が逗子市にある。館長の森裕美子さんの祖父が石原純であることから、彼の資料も収集、保存、公開している。この博物館のホームページを開くと「保田震災記」を読むことができる。



九条武子（左）と柳原白蓮



オキザリス・トライアンギュラス

千葉方式電磁気学習の始まり

朝 生 邦 夫

はじめに

今年(2021年)は2011年(平成23年)の東日本大震災・福島原発事故から10年目を迎えます。その前年、2010年(平成22年)の秋に、稲葉正先生が亡くなりました(享年88歳)。稲葉先生は、1951年(昭和24年)～1988年(昭和63年)まで、37年間、千葉県立千葉高等学校(以下「千葉高」)で物理、地学の教師をお勤めになりました。また、1975年(昭和50年)に提訴し、1992年(平成4年)に勝利した千葉川鉄公害訴訟(青空裁判)では、原告団長でした。

『自然の理法究めんと』は、稲葉さんの遺稿集となりましたが、その中に彼の高校理科教師としての諸実践・研究、それに後年たずさわった青空裁判の記録などがまとめられています。この本の中の「高校での電磁気授業」には、千葉物理サークルでの長年にわたる研究の成果が述べられています。それは、電磁気学習における「千葉方式」とでもよべるものです。

小島昌夫さんから「千葉方式の電磁気の授業内容などをまとめたものを書いたらどうか」と前々から勧められていました。そういわれて振り返ってみると、今日でも、「千葉方式電磁気学」は、その思想といい、展開の仕方といい、輝きを失っていない内容だと思われました。関係者の多くが物故してしまった現況のもとで、後世のためにポイントを書き残しておくことは、残された者の務めであると思い、書いてみることにしました。

なお、小島昌夫さんは、都立両国高等学校で物理を担当された教師で、都高教の副委員長もなさいました。退職後は、いくつかの私立大学の講師もなさり、現在、津田沼九条の会の世話人をなさっています。『江沢洋選集』(全6巻)には、第Ⅱ巻「相対論と電磁場」の巻末にエッセイを寄せられています。

千葉方式の始まり

昔、私たちが高校生であった1960～70年代初めにかけて、高校での電磁気の学習は、オーソドックスに電気と磁気とに分け、最初に電荷・電界、磁荷・磁界のそれぞれについてのクーロンの法則を学習して、最後は電気工学に至るものでした。単位もesu、emuなどというcgs単位系で、複雑でした(注1)。

小嶋昌夫さんの回想によると、電磁気学の改革は実教出版の高校物理の教科書づくりから始まった歴史があるといいます。この教科書づくりは、野上茂吉郎元東大教授の下で、野上さんの九大時代の教え子であった小嶋昌夫、林淳一さんたち、それらに加えて今井功、木下是雄そして江沢洋さんら気鋭のメンバーが集まって始まったということです。当時の実教出版の教科書「物理B」(注2)は、アメリカの理科教育の現代化(PSSC物理)などの影響も受けて、特に電磁気の単元が斬新なものでした。

実教版「物理B」の編さんにたずさわったメンバーなどの努力によって、科学教育研究協議会(科教協)の中でも、物理の授業、特に電磁気の単元の改革が広がっていきます。電磁気の学習を改革する具体的な実践は、その後、主に東京物理サークルと千葉物理サークルで行われました。

1967年（昭和42年）、『ファインマン物理学』の日本語版が出版されましたので、千葉物理サークルでは、東京歯科大学の林淳一さんを講師にして、その学習・研究会を始めました。そして、その成果を授業に反映していきました。

林さんは、このころ、科教協の事務局長でした。（その後、1972年（昭和47年）から1986年（昭和61年）まで科教協の委員長でした。）この年は、科協教千葉支部が発足した年でもあります（注3）。

私たちは、『ファインマン物理学』の哲学を土台にして、「電磁気の基本法則は、人間の日常の諸々の豊富な経験の中から発見されたものである。だからこそ、日常は経験することが少ない電磁気の諸現象については、生徒たちに実践的な経験をたくさんさせなければならない」という認識論で、高校での実際の授業を組み立てました。電磁気の授業は、毎回、生徒たちが実験を行って、レポートを提出する方式でした。評価は、そのレポートで行いました。

千葉物理サークルの『ファインマン物理学』の勉強会は、毎月1回行われていました（1967年から2007年まで、40年間1回も休まず続けられました）。そこには、千葉県内外の各高校の物理の教師たちだけではなく、大学で物理関係の勉強をしていた千葉高の卒業生たちも参加していました。今は日本共産党の委員長になった志位和夫さんも、千葉高卒業後、東大の理科に入って物理を学んでいましたので、夏休みの合宿学習会などに参加したことがありました。

電磁気学の具体的な展開例

電磁気学の本質を一言でいうと、ニュートン力学が「物体の物理学」だとすると、マックスウェル電磁気学は「真空の物理学」だということができます。電磁気学は、「物^{もの}」が存在しない空間、すなわち真空が、人間の意識とは独立に存在する客観的な実在であることを認め、その性質を研究し応用する物理学です。見ることも触れることもできない「物のない真空」が、ある性質を持って実在するなんて、生徒にとっては初めての経験です。「ないというものがある！」と言ったらよいのでしょうか？

電磁気学の理論から、真空中を伝わる「電磁波」が予言され、実際に存在することが実験によって示されました。

電磁波は、今日では、ラジオ、TV、スマホなど人類の日々の生活に生かされています。

私たちは、電磁気が示す様々な現象を体験させることを通じて、マックスウェルの

電磁気学の理論を平易に学習させる方式にすることにしました。電磁気学は、物体の物理学である力学とは違って、「直接目で見た感触たりしにくい」電磁気現象や空間を扱う分野ですから、具体的な体験を積み重ねれば、理解しにくいからです。

そのために、現象を簡単に明示できる鋭敏な測定器をそろえ、基本的実験をたくさん行い、体験を積み重ねることにしました。

エレクトロニク検流計は、微小電流を測定する高価な機械ですが、各班で使えるように、苦労して買いそろえました。これに自作したトランジスタ増幅装置をつないで、感度をさらに100倍アップすることで、微量の電荷の測定に使用できました。

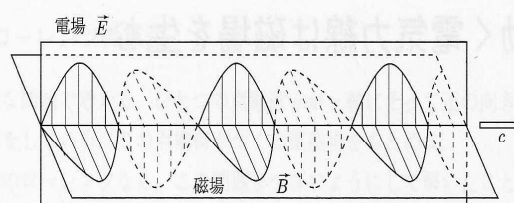


図 電磁波。定常的に一定の振動数、振幅で放射される電磁波の様子を示す。電磁波は横波で光の速さで伝わる（[実3] 図5-82）。

電磁波のイメージ



横川エレクトロニク検流計

これを改造して、クーロンメーターとしても使用しました。

磁石を作っている TDK の工場を見学に行って、エレクトロニク磁束計を見つけました。これを使えば、磁場の定量測定ができますから、各班 1 台使えるように買いそろえました。

この工場で強力電磁石の作り方も学びました。軟鉄心にエナメル線 1000 回巻きを 2 連つけて 20A の直流電流を流すと、0.1 ～ 0.2 テスラの磁束密度をもつ電磁石になります。これを使えば、フェライトに着磁をすることができます。千葉高が他校に磁石を供給する着磁センターになりました。

買えないものは、装置を組み合わせて使ったり、材料や部品から自作したりしました。例えば、ホール素子を使った簡易磁束計を 50 個作って、生徒一人一台使えるようにしました。今では、簡易磁束計が理科教材として市販されています。

電磁気学習は、進学校の千葉高でも、下記のように実験中心に組みましたが、生徒たちは喜んでついてきました。また、千葉高夜間定時制の勤労学生にも基本部分は同じプログラムで実施しました。定時制の生徒も「電磁気って、全然難しくないじゃん」といって、実験を楽しんでくれました。



横川エレクトロニク磁束計

電磁気学習の流れ

- ①電荷の測定 10^{-9} クーロン程度の電荷測定 定電流装置の活用 電流と電荷
- ②電場の存在とその大きさの測定 電荷の周りのクーロン場 電場の発生
- ③大電流周りの磁場の測定 アンペールの法則の測定
- ④磁場の強さの測定 ローレンツ力の測定 磁場の発生 電流と磁場との相互作用
- ⑤電磁波の発生とその速度の測定 電磁波と光 ファラデー効果の観測
- ⑥電磁気の応用諸実験 誘電体 交流 電気振動 モーター 発電機 LED など

電磁気の研究でわかったことが、アインシュタインが相対性理論にたどり着く糸口になっています。電磁波の速さは、観測者がどんな状態で動いているかにかかわらず、一定（光速）であること、観測者によって、電場と磁場とが入れ替わって見えることなどです。次号からは、相対論の理解まで見通して進める電磁気学の学習を具体的に展開します。

（注 1）cgs 単位系は長さの単位としてセンチメートル、質量の単位としてグラム、時間の単位として秒を用いる単位系。この単位系での電荷の単位が esu、磁荷の単位が emu である。

（注 2）昭和 38 年（1963 年）の学習指導要領改訂で設けられた科目。5 単位で、主に理系の大学に進学を希望する者が履修した。昭和 47 年（1972 年）の改訂でなくなった。

（注 3）発足時の中心メンバーは、稲葉正さん、石井信也さん、大村吉郎さん、延原肇さん、岩田好宏さん、盛口襄さん、戸石四郎さんなどである。稲葉さん、石井さん、大村さんは、千葉物理サークル、延原さん、岩田さんは、千葉生物サークルのメンバーである。盛口さんは、化学の教員で、当時、県立安房高等学校に勤務していて、安房地域でサークルを運営していた。戸石さんは、生物の教員で、県立銚子高等学校に勤務していた。1970 年（昭和 45 年）に銚子市で起きた東電火力発電所誘致反対闘争では、大気汚染などの問題を指摘し、市民と協力して誘致を白紙撤回させた。科教協が掲げる方針を市民運動に反映させた理科教師の一人である。

編集後記

オリンピック組織委員会前会長は、日本社会に構造的な女性差別が存在することを顕在化してくださいました。男女格差は、2019年のランキングで、世界の153カ国中、日本は121位なのだそうで、日本は今でも女性の地位がとても低い国です。

原阿佐緒、九条武子、柳原白蓮が世間の注目を集めたのは、大正から昭和初期です。この時代は今よりもずっと女性の地位が低かったのですが、この3人はそれぞれ、りんとして自分らしく生きたので、「近代美人」として、現代に語り継がれています。

本号から「千葉方式電磁気学習を振り返って」を連載します。「物理」は難しいというのが、高校生の平均的な感じかたではないでしょうか。その中でも、特に難しいとされているのが電磁気の単元です。朝生邦夫さんが電磁気をわかりやすく学習する授業プランを紹介してくださいます。



ポートレート
原 阿佐緒



紫カタバミ



鬨日荘 から保田海岸の眺望

静電気と電場の学習

朝 生 邦 夫

元千葉県立千葉高等学校教員

静電気の学習

高校生たちはみんな、小学生のころから磁石遊びを経験しています。鉄粉末を紙の上に広げて、その紙を磁石の上に載せれば、磁力線に沿って模様が描かれます。その模様から、磁力線のイメージを感覚的にとらえていますので、磁場については、すんなりと理解が進みます。

しかし、静電気のできる電場となると、途端に経験不足が露呈します。私たちは、電場のイメージを生徒たちにもたせるために、導体紙（注1）を使う実験を行いました。導体紙に電極を2つ置きます。その間の等電位点をつないで、等電位線を描きます。電気力線は等電位線に直交しますので、電気力線も描き加えます。電場の様子が紙に描きだされます。

学校で1980年代に使われた「謄写ファックス」とよばれる印刷機は、その原紙に導電性の裏紙が貼りつけられていました。当時は、この裏紙を導体紙として使うことができました。

静電気については、生徒は皆よく知っています。ビニールの下敷きをこすって微小な紙切れを吸いつけて遊んだり、冬にシャツやセーターを脱いだりしたときに、あるいは車に乗り降りしようとしてドアに触れたときに、ビリッときた経験をもっていて、それらが静電気の仕業であることを知っています。

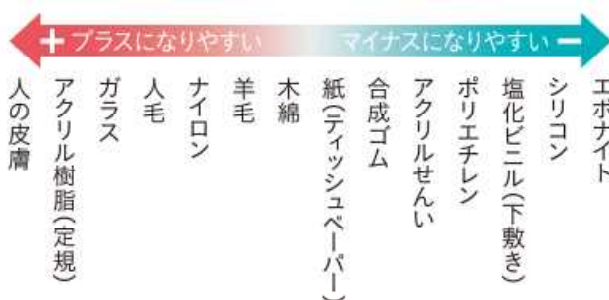
そもそも「エレクトロン $\lambda \epsilon \kappa \tau \rho \omicron \nu$ 」ということばは、ギリシャ語で「琥珀^{こはく}」を意味しています。琥珀は、摩けば磨くほど埃が吸いついてきます。ギリシャ人は、摩擦によって生じるこの不思議な「お化け」（静電気）を「電気」（electricity）と名付けたのです。

この摩擦電気の電荷をナノクーロン（ $10^{-8} \sim 10^{-10}$ C）程度の量で自由に扱うことができるように経験を積みます（注2）。

摩擦して電気を帯びる（帯電する）ものは、電気を通さない不導体（絶縁体）でできています。ほとんどのプラスチックは不導体です。透明プラスチック定規の多くはアクリル樹脂（以下「アクリル」）という素材でできています。アクリルを木綿のタオルやティッシュペーパーなど、柔らかい布や紙でこすると⊕に帯電します。プラスチックの下敷きの多くは、ポリ塩化ビニール樹脂（以下「塩ビ」）が素材です。水道管も塩ビです。塩ビは布や紙でこすると⊖に帯電します。

最初に、電荷に⊕と⊖があることを確認します。アクリル板や塩ビ板に糸を付けます。これを摩擦して帯電させ、ブランコのようにつるします。これに摩擦して帯電させたアクリル板や塩ビ板を遠くから近づけます。アクリル板とアクリル板、塩ビ板と塩ビ板では、同じよう

■摩擦による静電気の帯びやすさ(帯電列)



たとえば、ティッシュペーパーでこすったアクリル樹脂の定規はプラスに、塩化ビニルの下敷きはマイナスに帯電します。

に反発力（^{せきりよく}斥力）が働きます。ところが、アクリル板に塩ビ板を近づけると、今度は引力が働きます（右図）。

このことから、電荷には2種類あることがわかります。アクリルが帯びる電気を⊕、塩ビが帯びる電気を⊖としておきます。

次に、箔検電器^{はく}を使い、静電誘導のおさらいをします（注3）。金属は自由電子をもつ導体です。箔検電器に⊕に帯電したアクリルを近づけると、検電器内の⊖が円板のほうに引き寄せられて、円板が⊖、残った箔の側は⊕に帯電します。この現象が静電誘導です。円板に⊖の電荷が、箔の側に⊕の電荷が集まったことになります。箔のついている金属棒も⊕、箔も⊕に帯電するため、斥力が生じて、箔が開きます。

アクリルを近づけたまま、箔検電器の円板に指を触れると、箔検電器の箔が閉じます。アクリルの⊕の電荷に引き付けられて、円板の⊖電荷は金縛りになっています。その間に、箔の⊕の電荷が手を伝わって遠くへ逃げます。電荷は、最終的には地球に逃げますから、こういう操作を「アースをする」といいます。その結果、箔が閉じます。こうやってから円板から指を離すことで、箔検電器の円板に⊖の電荷を捕獲できます。アクリル板を遠ざけると、円板に残された⊖の電荷は箔検電器の金属部分全体に広がって、箔に戻った⊖の電荷同士が反発して、箔が少し開いた状態になります。この状態の箔検電器に、⊖に帯電した塩ビを近づけると、箔が更に広がります。電荷に⊕と⊖があることが、箔検電器でも確認できます。

次に、電気盆^{でんきぼん}を使って実験します。電気盆は、導体の金属板に不導体の柄をつけたもので、静電誘導を利用して電荷をためる道具です。右の写真のように、電気盆は身近にある材料で自作できます。金属板の部分は、金属製のクッキー缶のふたなどを使います。

帯電した下敷きのプラスチック板（以下「帯電板」）に電気盆の金属板を載せます。帯電板は不導体ですから、その電荷が電気盆に移動することはありません。

静電誘導によって、金属板の帯電体と接した面に、帯電板がもつ電荷と反対の電荷が引き寄せられます。

帯電板の素材が塩ビであれば、⊖に帯電していますから、その上に載せた金属板では、⊕の電荷が帯電板に引きつけられます。この状態でネオン管（注4）を金属板に触れさせると、⊖の電荷が金属板からネオン管を通して逃げ（アースをされて）、ネオン管が一瞬点灯します。

金属板には、⊕電荷が捕獲されています。電気盆を持ち上げてから、金属板にもう一度ネオン管に触れさせると、捕獲されていた⊕の電荷がアースをされて、再びネオン管が光ります。

次のページの図の左上のように、リード線の途中に検流計をはさんでアースをすると、電荷に⊕と⊖とがあることを確かめることができます。例えば、⊕に帯電したアクリル板に電気盆を載せてアースをすると、検流計の針は+のほうに振れます。次に電気盆を持ち上げてからアースをすると、今度は検流計の針が-のほうに振れます。

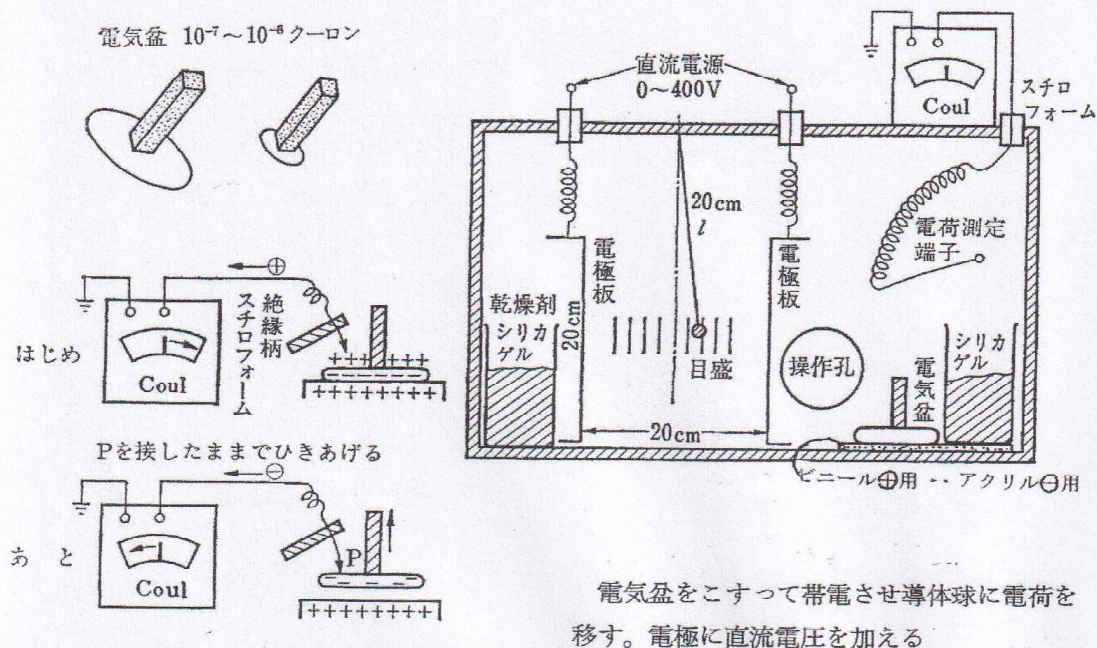
（検証）



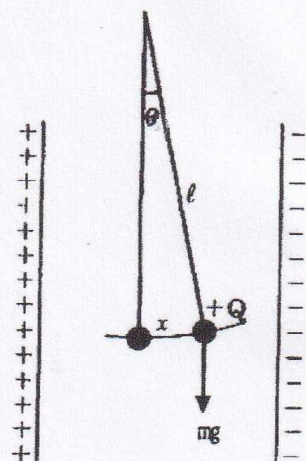
箔検電器



電気盆



電気盆で帯電球に自由に電荷を取り分けられるように遊んでおく



電場の大きさ測定図

$$F = mg \tan \theta = mg \frac{x}{l}$$

$$E = \frac{F}{Q} \quad \text{で電場の大きさが求まる。}$$

静電気力と電場の学習

瞬間接着剤で発泡スチロールの小球にナイロン糸（注5）か、極細いスチロールを熱して引き延ばした糸を付けます。その後、この小球に墨（ドータイト）を塗ったり、あるいは極薄のアルミ箔を被せたりして、導体球に加工します。墨に含まれている炭素は、非晶質（アモルフォス）の導体です。電気盆で捕獲した電荷を導体球に付けると、さまざまな遊びができます。

導体球を使いなれたら、これを図のように電極板の間に吊るします。電気盆で導体球に電荷を移してから、直流電源を使って電極板に電圧をかけます。帯電球は、極板間の電場の影響を受けて鉛直下向きから x の距離移動します（振り子が θ の角度傾きます）。それを測定します。実験に当たって、鋭敏な検流計を改造したナノクーロンメーター（注6）を使って、導体球に帯電させた電荷 Q を測っておきます。

x の値が小さければ、 静電気力 $F = mg \tan \theta \doteq mg \frac{x}{l}$ になります。

小球がもつ電荷を Q とすると、 電場の大きさ $E = \frac{F}{Q}$ になります。

生徒の実験レポート

電荷と力を及ぼしあう空間(=電場)の発見

1. 小さな導体球に電気盆を使って電荷を与え、球に移った電荷をナノクーロンメーターを使って測る。幾度も測って安定した量をもたせる練習をする。

電荷の量はいくらか。 $Q=0.50 \times 10^{-9} [\text{coul}] = 5.0 \times 10^{-10} [\text{coul}]$

2. 糸長 $l=0.40\text{m}$ に吊した導体球の両面の導体板に200～300ボルトの電圧を加える。
($4\mu\text{F} \sim 300\mu\text{F}$ くらいのコンデンサーを200ボルトで充電しておく)
このときの導体球の変化を調べ、水平方向への移動距離 x m を測れ。
(注意)コンデンサーの扱いは危険なので慎重に。実験が終わったら必ず
両極をショートさせて放電させておくこと。

$x=1.0[\text{cm}] = 0.010[\text{m}]$

3. この帯電球の質量は導体板の横に測って貼ってある。大体 10^{-6} kg である。 ($4.0 \times 10^{-6} \text{ kg}$)
このおもりを l で吊した振り子を x だけ横に振らせるための横向き力はいくらか。

$$F = mg \tan \theta = mg \frac{x}{l} \quad \text{から、} \quad F = (4.0 \times 10^{-6}) \times 9.8 \times \frac{0.01}{0.40} = 0.98 \times 10^{-6} \doteq 1.0 \times 10^{-6} [\text{N}]$$

4. この空間から電荷に加えられた力は、 $1[\text{coul}]$ について幾 $[\text{N}]$ にあたるか。
これが電場 E の値である。

$$E = \frac{F}{Q} \quad E = \frac{1.0 \times 10^{-6}}{5.0 \times 10^{-10}} = 0.2 \times 10^4 = 2.0 \times 10^3$$

5. このような空間が $0.10[\text{m}]$ 続いていたら、その間の位置エネルギーはいくらか。
 $[\frac{\text{Joule}}{\text{coul}}]$ は、すなわち $[\text{volt}]$ である。この値が2.の極板間にかけた電圧と一致するか。

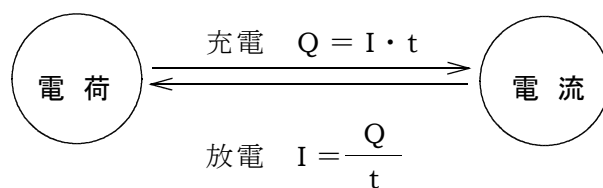
$$V = E \cdot d = (2.0 \times 10^3) \times 0.10 = 200 [\text{volt}]$$

はじめコンデンサーを200[volt] で充電したので一致している。

距離 x の値 (または振り子の傾き θ の値) と電荷 Q の値から、2枚の極板間の電場の大きさを計算によって求めることができます。これを行った生徒のレポートを1例掲載します。
+ と - の電極板を2枚平行に置いたものは、平行板コンデンサーです。

この実験では、平行板コンデンサーの間にある電場の大きさを測定しています。

コンデンサーは、+と-の電荷をたがいに引きつけ合わせることで身動きできないようにする装置です。すなわち、電荷の貯水池です。この後、コンデンサーを使って、充電・放電の学習をします。



(注1) 理化器具カタログに掲載されている。静電除去シート、導電ゴムシートでも代用できる。

(注2) クーロンは、電気量の単位で、記号は C または Coul。もともとは電流の 1 A (アンペア) を電流間に働く力で決めて、その 1 秒間の流量で 1 C を決めた。現在では、逆に 1 個の陽子がもつ電荷 (電気素量) e を、 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ と定め、電流の 1 A は、毎秒 1 C の電気量が流れる状態とする。 1 nC (ナノクーロン) $= 10^{-9} \text{ C}$ (クーロン)

(注3) 中学 2 年の静電気の学習で、箔検電器を使う。

(注4) 理化器具カタログにネオンランプ (静電気実験用) で掲載されている。管型でなければ格安で入手できる。大きな電気盆にすれば、授業記録のように蛍光灯も点灯できる。

(注5) ナイロンテグス (ハリス) の 0.1 ~ 0.2 号。釣具店で購入できる。

(注6) 鋭敏な検流計にトランジスタを使った増幅装置を付けたもの。第 1 回で紹介したエレクトロニク検流計は、精度が 10^{-8} 程度なので、これに 100 倍増幅のトランジスタ回路をつけて $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ C}$ 程度の微小な電荷を計量できるようにした。現在は、微小な電荷まで計量できるクーロンメーター (電荷計) が実験器具として市販されているので、それを使えば簡単に実験を行うことができる。

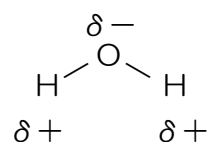
参考 高校「物理」の教科書に載っている電場の写真

ペトリ皿 (シャーレ) に小さな種子を小さじ 1 ぱいほど入れ、四塩化炭素を注ぐと、種子はランダムに分散して液面に浮かび上がります。この液に電極を差しこんで高い電圧をかけると、種子が規則正しく並び、電場にできた電気力線が可視化されます。

四塩化炭素は、密度が大きい (約 1.6 g/cm^3) 液体なので、種子が浮かびます。四塩化炭素分子は極性をもちません。だから、基本的に電場に反応しません。

水分子は極性をもち、水素原子がわずかに +、酸素原子がわずかに - の電気を帯びています (右図)。そのため、電場の中では、分子が同じ向きに規則正しく整列します。

種子は水を含んでいます。電場の中で、種子の中の水分子が同じ向きに整列します。その結果、誘電分極とよばれる現象が起きて、種子の両端に \oplus と \ominus の電荷が現れます。液面に浮かんだ種子の \oplus に帯電した端は、隣の種子の \ominus に帯電した端と静電気力で引き合ってくっつきます。たくさんの種子がたがいにくっつき合い、全体で電気力線を示す模様を描き出されます。



水分子

四塩化炭素は、揮発性の毒物ですから、授業では実施できません。(編集者 濱中註)

授業記録から

生徒たちに
当番制で日誌
をつけさせて
いた。

電気盆

4月18日(水) 雨
遅刻者 15人
欠席者 0人

[今日の授業] --- おもに実験
[授業内容]
・実験①

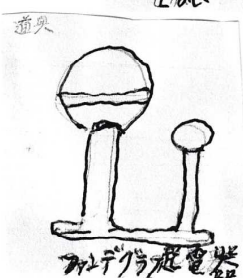
道具
でかいスチロール板
蛍光灯
でかい電気盆 アルミ製のふた

① でかいスチロール板をこする
② それに蛍光灯をつけた瞬間に光る。

スチロール板 → マイナスに帯電
でかい " → より大きい電気を帯びて光る。

① 電気盆にアースして光る。
② もうあげて 光る。

ヴァンデグラ フ起電機



髪の毛を逆
立たせたり、
遊びをするこ
とを通して、
静電気を学習
する。

・数万ボルトでも電流がとても小さいので、さわる危険な事はない。

実験①-2

・ここに蛍光灯が一瞬光るのは実験①と同じことである。

水を帯電させ る

4月19日(木) 晴れ
遅刻者 1人
欠席者 1人

<前回の補足>
スチロール板に蛍光灯をつけて光らせることが
実際はスチロール板の上に電気盆があてとた当てていたのだ。

図a

一方、
スチロールをこすって負に帯電させたものと、電極
とを並べ、その間に水滴をたらす。その際 アース
電極につないで ⊕ を逃がしてほう。

一方、
同じく落ちてきた水滴は正に帯電する。

その結果

箔検電器にとってみる。箔が開くことが分かる
よって水は帯電していることが分かる。
→ まだ正か負かは分からない。

これはなぜなのかわか？負に帯電している。この機

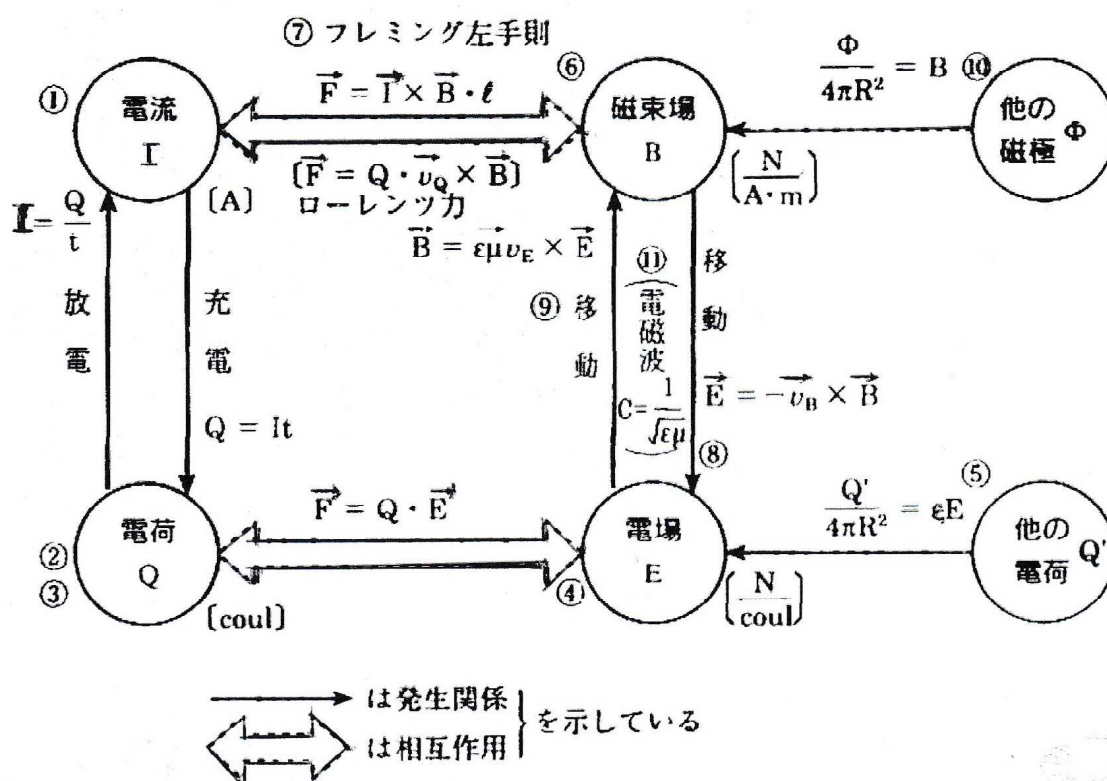
今度は別の箔検電器にとってみる。そして帯電させたビニル棒を近づけて
と箔が閉じてしまった。ビニルは負に帯
するはず、
ゆえに、水は正に帯電している。

電流と電荷、電荷と電場

朝 生 邦 夫

元千葉県立高等学校教員

電磁気の学習の始めに、身近な静電気の実験、電気盆や微小電荷の捉え方などをつい詳しくお話してしまいましたが、ここでもう一度基本図に立ち返って見たいと思います。



基本図 電磁気学習の全体像

今回は、定電流装置を使って、 と の電流と電荷との関係を学習する授業、および の電荷 Q と相互作用する 電場 E の存在を学習する授業を扱います。

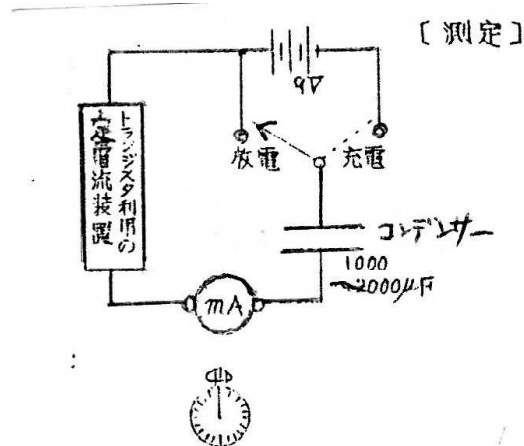
これらを測定するための用具としては、「ナノクーロンメーター」(エレクトロニク検流計を改造して微小な 10^{-9} クーロン程度まで測れるようにした電荷測定器(これについては前回までに取り上げた。))とトランジスタを応用した「定電流装置」とが必要です。

「定電流装置」は必須の測定器

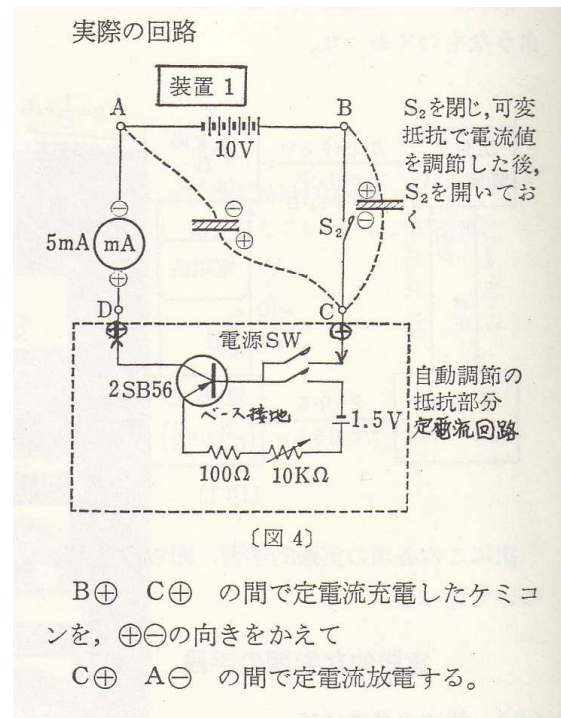
「定電流装置」は、電流と電荷のイメージをしっかりとつかませるためには必要な装置です。電荷の「ため池」としてのコンデンサー(キャパシターともいう)を一定電流で充放電させて、

$A \cdot \text{sec}$ = Coul (クーロン) が「保存量」であって、ひとつの実体の量をあらわすものであり、したがって、電流 A は、その実体の 流量 / sec であることを飽きるほど経験させます。

定電流装置は自作しました。原理としては、電流が大きくなれば直列に入れた抵抗を大きくし、電流が小さくなれば抵抗を小さく加減すればよいのですから、その役目をトランジスタの特性を利用して自動的にやらせる装置を作ります。

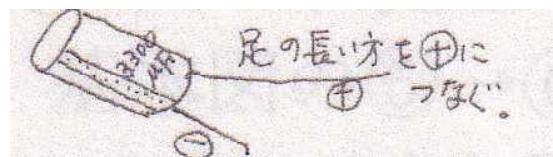


定電流装置を組み込んだ実験装置の回路図



この装置を使った生徒実験の実際とそのレポートを紹介します。

今回は $3,300 \mu\text{F}$ の電解コンデンサー (右図) を使った。



電解コンデンサー

実験結果

充 電			放 電		
電 流 mA	時 間 Sec	mA · Sec	電 流 mA	時 間 Sec	mA · Sec
1.0	10.0	10.0	2.0	5.8	11.6
1.0	20.0	20.0	2.0	11.3	22.6
1.0	10.0	10.0	10.0	1.1	11.0
2.0	10.0	20.0	1.0	20.1	20.1
2.0	10.0	20.0	4.0	5.0	20.0
3.0	10.0	30.0	1.0	27.8	27.8
3.0	10.0	30.0	2.0	15.4	30.8
3.0	10.0	30.0	5.0	6.0	30.0
10.0	1.0	10.0	1.0	10.8	10.8

(感想)そこそこの結果であると思う。今度は ストップウォッチの計測に正確さを求めたい。

$Q [\text{coul}] = I \cdot t [A \cdot \text{sec}]$ という量があることを確認できます。

電場 E [N / coul] の発生

その1 点電荷の周りに発生する静電気力に関するクーロンの法則 基本図の

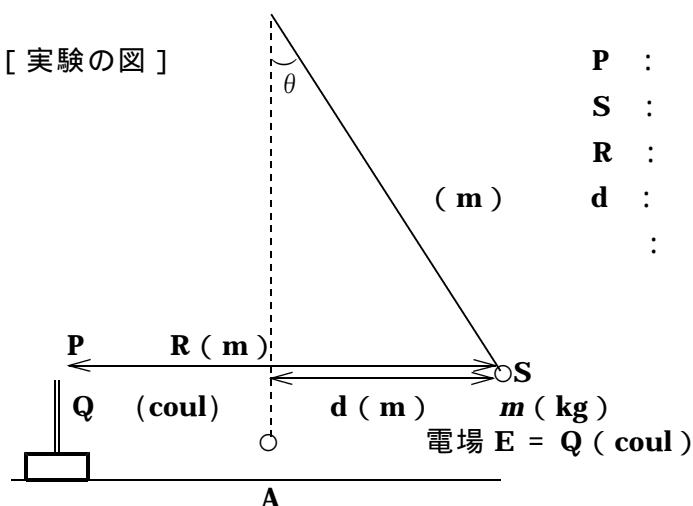
点電荷 P の周りには、小球 S が $F = mg \tan \theta$ の力を受ける電場が発生 (ト図)。

電場の強さ $E = \frac{F}{Q}$ だから、 E は d に比例している。その d が R^2 に反比例するかを見る。

(生徒の実験ノートより) 原本は手書きである。

電磁気実験報告 (6) 「電荷のまわりに電場ができる」

[実験の図]



P : 原因となる導体小球
 S : 電場 E をつくる導体小球
 R : P と S との距離
 d : 原位置 A から S までの距離
: 糸の長さ

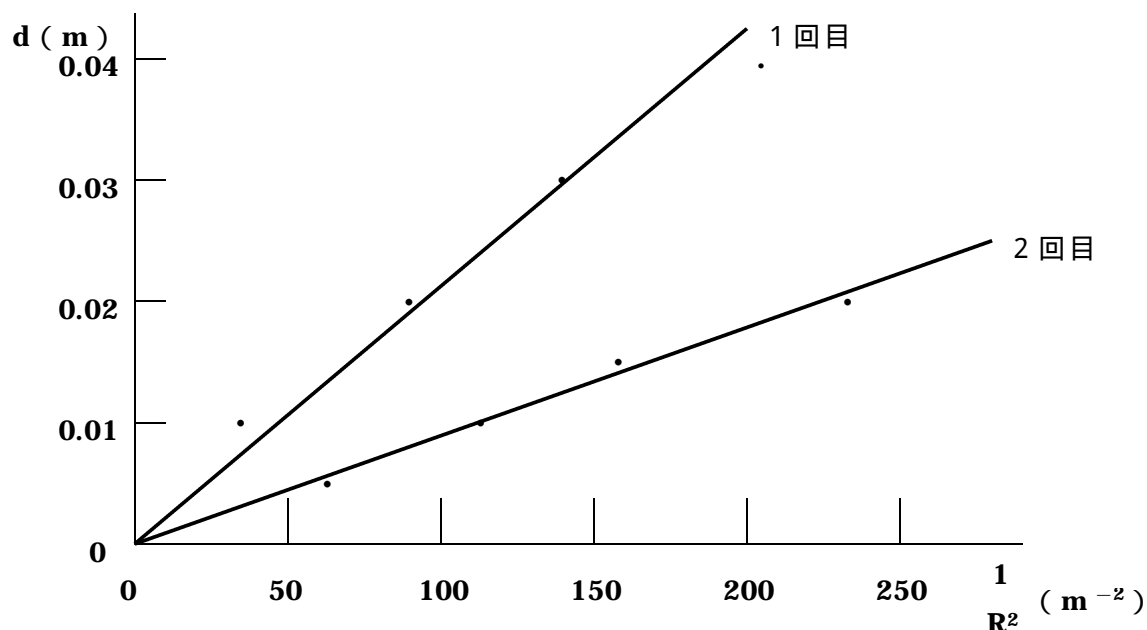
[測定]

第 1 回

第 2 回

	d (m)	R (m)	R^2 (m)	$\frac{d}{R^2}$ (m ⁻²)
1	0.01	0.17	0.029	35
2	0.02	0.11	0.012	83
3	0.03	0.085	0.0072	138
4	0.04	0.070	0.0049	204

	d (m)	R (m)	R^2 (m)	$\frac{1}{R^2}$ (m ⁻²)
1	0.005	0.13	0.017	59
2	0.010	0.095	0.0090	111
3	0.015	0.080	0.0069	156
4	0.020	0.065	0.0042	237



グラフより d が $\frac{1}{R^2}$ に比例することがわかる。したがって E は d に比例するから

$$E \propto d \propto \frac{1}{R^2} \quad \text{となり} \quad E \propto \frac{1}{R^2} \quad \text{となる。}$$

$$E = \left(-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Q \cdot Q}{R^2}$$

よって E は R^2 に反比例することがわかる。

これらの実験から、点電荷の周りに発生する電場の強さ E は、距離 R の 2 乗に反比例し、電荷の大きさ Q に比例することがわかります。これを「静電気力に関するクーロンの法則」(注)といいます。

この関係をわかりやすくするために、電束という「模型」を考えます。半径 R の球の中心に点電荷 Q があるとします。この電荷の大きさを Q (coul) としたとき、そこから Q 本の電気力線が出ていて、球の表面を貫通すると約束します。この電気力線を電束とよびます。電束を使えば、その単位面積当たりの密度で、球の表面の電場の強さ E を表わすことができます。半径 R の球の表面積 S は、 $S = 4\pi R^2$ ですから、誘電率(比例定数)を ϵ_0 とすると、

$\frac{Q}{4\pi R^2} = \epsilon_0 E$ となります。 R は点電荷 Q から電場 E までの距離ですから、この式は、静電気力に関するクーロンの法則そのものです。

$$\boxed{\frac{Q}{4\pi R^2} = \epsilon_0 E} = D \quad D \text{ を電束密度といいます。したがって、} E = \frac{D}{\epsilon_0}$$

(原因) (結果)

この表式は「場の考え方」を重視した表現です。従来の「遠隔力」として 2 電荷間の力として表現するには、他の電荷 Q' によって距離 r の地点にできる電場が

$$\epsilon_0 E = \frac{Q}{4\pi R^2} \quad \text{だから} \quad E = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 R^2}$$

$$\text{ここに電荷があつて力を受けるので、} \quad F = Q \cdot E = \frac{Q \cdot Q}{4\pi \epsilon_0 R^2} \quad \text{となります。}$$

電場の強さ = 電束密度(電気力線密度) を使つてのコンデンサーの性質の理解

原因量が 0 次元で 1 次元の空間に場を作る場合(例えば点光源で一直線上のレーザー光)は、場の強さ(明るさ)は距離に無関係です。原因量が点状で空間が 3 次元の場合(点状電荷がつくる電場)では、上に見たように場の強さは距離の 2 乗に反比例します。原因量が 1 次元(例えば 1 本の長い蛍光管など)の場合には、場の強さ(明るさ)は距離に反比例します。原因量が 2 次元 8 桁の電卓(平面上)に分布している(例えば平面コンデンサー)場合は、場の強さは距離に無関係になります。

平面に分布する電荷を電束密度を使って考えます。極板の面積 S の平行板コンデンサーの上面に電荷が $+Q$ 、下面に電荷が $-Q$ クーロン貯まっているとすると、電束は Q 本上からトへと通ることになり、電束密度は $\frac{Q}{S}$ となります。

あるいはこのように考えても可?

上面で $2S$ の上下面に $+Q$ 本出て、下面で $2S$ の上下面に $-Q$ 本入ると考えて、極版間での電束数は $\frac{Q}{2S} + \frac{Q}{2S} = \frac{Q}{S}$ 上極版の上、ト極版のトでは互いに打消しあつて電束はない。

コンデンサーの容量測定 $Q = CV$ の確認実験

以下、実験プリントより

大きさの異なるいろいろな電圧の電源で、1つのコンデンサーに充電しうる最大電荷（電気量）を測定し、電荷の量 Q と電圧 V とが比例するかどうかを見る。そのために $\frac{Q}{V}$ の値を1回ごとに出して比較してみる。一定していれば、そのコンデンサーの蓄電性能を表す値（容量：単位[**Coul / V**]別名[**Farad**]）として役に立つ。充電回路に定電流装置のような大きい抵抗が入っていなければ、充電は（放電も）一瞬の間にその大部分を終え、数秒で事実上完了する。このやり方で低電圧用・大容量のケミコンを一瞬で充電し、放電には定電流装置を用いて放電時間を測って電荷量を測ってみる。

（耐電圧 **WV** の範囲内で充電する）

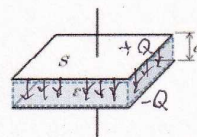
生徒の実験レポートより

$C = 3300 \mu F$ のケミカルコンデンサー

$$D = \epsilon \cdot E$$

コンデンサー

極間電圧 V



このとき、電束密度 D は次のようにあらわせる。

$$D = Q/S = \epsilon \cdot E$$

$$\therefore E = Q / (\epsilon \cdot S) \quad \text{コンデンサーの電場の強さ}$$

$$\text{また、} V = E \cdot d \text{ より、} V = Q \cdot d / (\epsilon \cdot S)$$

$$\text{また、} Q = CV \text{ より、} C = Q/V = \epsilon \cdot S / d$$

従って、コンデンサーの容量 (C の値) を大きくするには

極板間の距離 d を小さくする

極板の面積 S を大きくする

誘電率 ϵ の大きい物質 (油など) を極板間に挟むなどの工夫をすればよいことになる。

放電電流 mA	放電時間 sec	電荷 Q mAsec	充電電圧 V	容量 $C = \frac{Q}{V}$	μF 値
1.0	3.0	3.0	1.0	3.0	3800
1.0	4.0	4.0	1.0	4.0	4000
1.0	7.0	7.0	2.0	3.5	3500
1.0	7.2	7.2	2.0	3.6	3600
1.0	10.0	10.0	3.0	3.3	3300
1.0	11.3	11.3	3.0	3.7	3700
1.0	13.0	13.0	4.0	3.3	3300
1.0	13.2	13.2	4.0	3.3	3300
1.0	17.0	17.0	5.0	3.4	3400
1.0	17.0	17.0	5.0	3.4	3400
1.0	20.0	20.0	6.0	3.3	3300
1.0	18.5	18.5	6.0	3.1	3300
1.0	18.0	18.0	5.5	3.3	3300
1.0	15.0	15.0	4.5	3.3	3300
1.0	13.0	13.0	3.5	3.6	3600
1.0	9.0	9.0	2.5	2.8	2800

[Volt] [mFarad] [μ Farad]

（考察）結果を見てわかるように、ケミコンに表示されている容量（ **$3300 \mu F$** ）のほぼあっているが、これを超えた数値も出てしまった。ストップウォッチか、百分の一秒まで正確に測れる時計があれば、もう少し正確に出たと思います。

(寸評) コンデンサーの表記容量誤差は±10%くらいはざらでしょう。

$$Q = CV \text{ から } C = \frac{Q}{V} \text{ で求めた値とよくあっていますね。}$$

電束・電気力線・電束密度 コンデンサーの容量

(授業プリントより)

Q本の電束のほとんど全部が面積 $S \text{ m}^2$ に分布するので、(面が十分に広ければ一様に分布する)
 $D = \frac{Q}{S} \quad E = \frac{D}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$ (真空中以外なら ϵ)

極間電圧 $V = E \cdot d = \frac{Q \cdot d}{\epsilon_0 S}$
 このキャパシタの容量は $Q = CV$ の関係から
 $C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ [Farad]

【観察例】平行板キャパシターによる ϵ_0 の測定 (データ)

$Q = 1.2 \times 10^{-8} \text{ coul} \quad S = 0.20 \times 0.20 = 0.040 \text{ m}^2$
 $D = \frac{Q}{S} \quad E = \frac{D}{\epsilon_0} \quad V = E \cdot d = \frac{Qd}{\epsilon_0 S}$

$\epsilon_0 = \frac{Qd}{V \cdot S} \quad V = 1000 \text{ Volt} \quad d = 0.030 \text{ m}$

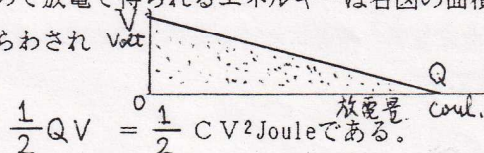
$\epsilon_0 = \frac{(1.2 \times 10^{-8}) \times (0.030)}{1000 \times (0.040)} = 9.0 \times 10^{-12}$
 単位は $\frac{\text{Coul}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{m}}{\text{Joule/Coul}} = \frac{\text{Coul}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{N}}$

この測定はやさしく、しかも正確にできる。

この例にならって、もう少し低電圧で実験してみよう。(120~150 Voltで)

◎ コンデンサーが充電されて持つエネルギー

電圧 V Voltで Q coulたくわえられているとき、
 1 coulあたりのエネルギーが V Jouleだから全体で QV Jouleのエネルギーを持つかという、
 そうはならない。放電量に比例して電圧が下がるので放電で得られるエネルギーは右図の面積であらわされ



充電する時には逆にこれだけのエネルギーが要る。

耐圧の大きい $2\mu\text{F}$ 、 $4\mu\text{F}$ のオイルコンデンサーを使って実験する。電圧計と容量計(デジタルマルチメーター)を使用できるとよい。

左の低電圧での生徒実験の授業ノート

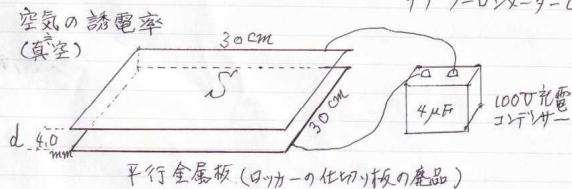
6月12日(火) ぐもり

今日は梅雨なのに比較的低温!!
 実験がうまくいった。

① $Q = \frac{\epsilon_0 S}{d} V$ より
 $\epsilon_0 = \frac{Qd}{SV}$ を求める

$S = 9.0 \times 10^{-2} [\text{m}^2]$
 $d = 4.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$
 $V = 1.0 \times 10^2 [\text{Volt}]$
 $Q = 2.0 \times 10^{-9} [\text{Coul}]$

↑ 7-コンテ-ターで計る。



$\epsilon_0 = \frac{(2 \times 10^{-9}) \times (4 \times 10^{-3})}{(9 \times 10^{-2}) \times 10^2} = 8.9 \times 10^{-12}$

$(\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}) \quad \left[\frac{\text{Coul}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right]$

② コンデンサーの容量 C の測定
 $C = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ より求める

$\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12} \left[\frac{\text{Coul}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right]$
 $S = 9.0 \times 10^{-2} [\text{m}^2]$
 $d = 4.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$

$C = \frac{(8.9 \times 10^{-12}) \times (9.0 \times 10^{-2})}{4.0 \times 10^{-3}} = 200 \times 10^{-12} [\text{F}]$
 $= 200 [\text{pF}]$

容量計で実測すると 180 [pF]

容量計で検証する。

コンデンサーに蓄えられる静電エネルギー

$$\frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 \text{ (Joule)}$$

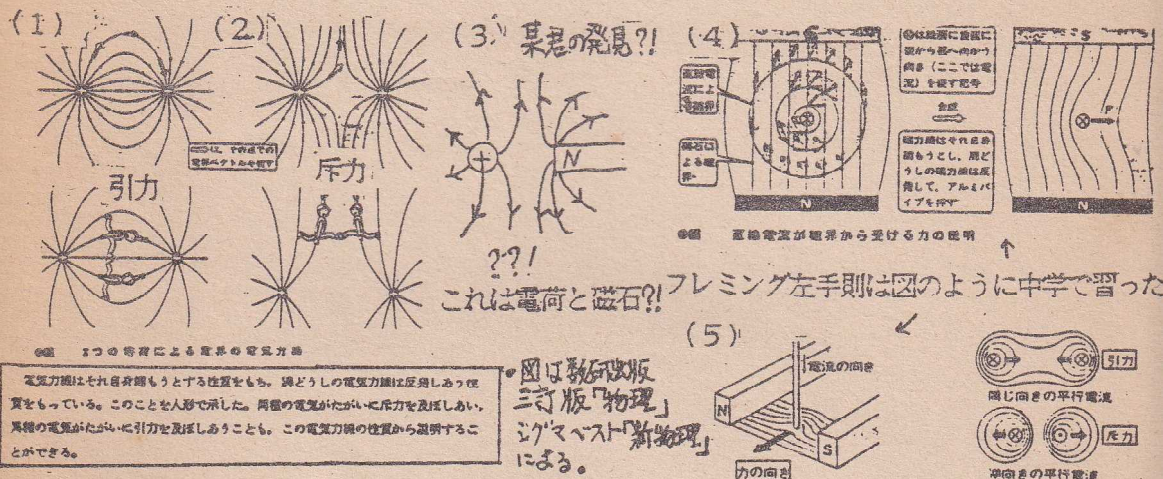


[写真] $4\mu\text{F}$ のオイルコンデンサー

「場」の考えに見られるまちがいの例 (A)

- (I) 「場」と「場」とで力が働きあったりしない。
(II) 「場」は、それを創り出した原因には作用しない。

授業ノートに次のような質問がのりました。「Flux (力線、電束、磁束) 同士の力の働きあいを考えて、次のような説明はできないのですか?」というものです。



(I) これはプリント (P21) でも触れたように、場というものがその相互作用の相手に電荷 (E のとき) や電流 (B のとき) を考えているものであって、場と場との間に力など働きようがないことを理解してください。こんな例は中学校の教科書だけかと思ったら、あるある…多くの高校の物理の参考書・教科書など軒並みでした。ここにあげた図は、「程度の高い」といわれる数研出版の教科書からの引用です。このような図を見た生徒が (3) のような図を描いてしまつて??もナンセンスだと笑えませんね。

(II) また、(4) や (5) はよくある俗流の「説明」で、これによって $\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \cdot e$ (または $\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$) を説明したつもりになっている図で、これも数研や第一学習社などの教科書やあれこれの参考書に載っているのですが、これは認識の基本 (「原理」は天下りに与えられるのではなく、発見されるべきものだ) を知らない誤りです。電流が磁束場で力を受けるのは、「説明できるものではない」のであって、まったくすべての経験を通じてまさに「発見されるべき」基本経験なのです。「説明」したら、その「力線の性質」をどんな基本経験で説明するのでしょうか。小学校以来の「説明理科」は、「すべてを天下りの原理で説明しつくして (!) しまふ」というまったく恐ろしい科学否定の論理で貫かれています。だから、同様に作用反作用を説明してしまうような先生も出現するのです。(分子間力で説明するのだそうです。) こういう「説明」を理由も考えず暗記させられている人も多いので注意すべきことです。そうでなくとも (4) は自分が創り出した場が自分と相互作用するなんて原因・結果の関係がまったくメチャクチャですね。