

電磁気力と場, 光

三井隆久 ©

Department of Physics, Keio University School of Medicine,
4-1-1 Hiyoshi, Yokohama, Kanagawa 223-8521, Japan

(Dated: September 26, 2016)

物質と空間には電磁氣的性質がある。電磁気現象は、静電気、磁石、電磁波、光などだけでなく、化学結合を担う力の源であり、生命現象を含め世界の多様性を織りなす主たる要因である。ここでは、電磁氣的性質の物理学における位置付け、電磁気現象を担う最も重要な物質的実体である電荷、空間を扱う上で欠かせない概念である場について述べる。

I. 電磁気学の位置付け

電磁気学は、力の1つの種類である電磁気力について定式化した学問である。力は、ニュートン力学によって質量を持った物体の運動状態を変える作用として明確に定義されている。しかし、これだけでは世の中にはどの様な力があるのか判らない。世の中に存在する力について、具体的な知識が必要である。

現在知られている力は、重力、電磁気力（静電気力と磁力）、弱い相互作用、強い相互作用の四種類だけである。重力は、力としては最も小さい部類であり、天体のように質量の大きな物体が関与する場合に顕著である。電磁気力は、比較的大きな力であるが、プラスとマイナスがほぼ等量あるため、ゼロになる場合が多く、日常生活で大きさを実感することは少ない。しかし、原子や分子のスケールでは顕著であり、最も重要な力である。弱い相互作用と強い相互作用は比較的に強い力であるが、力の作用する距離が極端に短く（原子核の大きさ、 10^{-15}m 程度）、 β 崩壊や核反応などの原子核内部や素粒子レベルで重要となり、原子より大きなレベルでは電磁気力や重力の方が遙かに大きいため無視できる。

これらの力はいずれも物体の性質であるばかりでなく、空間の性質でもある。すなわち、物質が何もない真空が物質に力を及ぼすのである。このため、力の理論は場の概念を用い、広がりのある3次元空間の理論として定式化されている。

A. 「なぜ」と「どのように」

力学と同じように電磁気学も自然現象の基本的な部分を取り扱う。これゆえ、「なぜ？」に対してほとんど答える事ができない。講義では、「どのようにになっているか」について主として述べる。誤解しないでほしいが、研究者は常に「なぜ」という疑問を持ちながら研究し、電磁気学の理論体系を構築したが、私の講義では完成された理論を「どのように」という観点で説明する。

II. 電荷—電磁気現象の最も重要な物質的実体—

ガラスと毛糸をこすると両者間に力が働く（いわゆる静電気）。こする前と比較して、こすったあとの物質には何か新しい性質もしくは物質があるから、力が働いているとみなす。（神秘的な何かがあるなどとは思わない。）この力を静電気力と呼び、静電気力の源になっている何か（実体）を電荷と呼ぶ。従って、電荷間に力が働くのは「定義から自明」ということになる。

電荷は質量と同じように、この世の中の物質が持っている性質である。質量に重力という力に関連した性質があるように、電荷には静電気力という力が作用する。観察結果によれば電荷間には引力が働く場合と斥力が働く場合があ

り、このことを正負の2種類の電荷で表現する。同じ符号の電荷どうしは斥けあい、異なる符号の電荷どうしは引き合う。これらは、実験により得られる事実である。電荷の実体について調べると、原子を構成している電子や原子核に電荷という性質が備わっていることがわかった。具体的には、原子核には正の電荷があり、電子には負の電荷がある。

異なる物質をこすった時に生じる静電気は、電子を用いて説明できる。物質は種類や形状によって電子を受け取りやすかったり、失いやすかったりする。これゆえ、異なる材料や形状の物質を接触させ、引き離すと一方の物質から他方へわずかに電子が移動する。この結果、物質中の正電荷と負電荷のバランスが崩れて、物質が静電気を帯びるようになる。セーターを脱ぐときの火花や、雷など不快な静電気現象は多い。日常生活で静電気は不都合な場合の方が多いため、なぜ、静電気現象が生じるのかと疑問に思うかもしれない。しかし、物質を構成する原子が電荷を持つ電子と原子核からなるのだから、もっと多くの静電気現象が身近に存在しても不思議ではない。むしろ、静電気現象が身近に少ないことの方が不思議である。これは、静電気力が比較的大きな力で、小さくて軽くて動きやすい電子に作用すると電子がすみやかに動いて、我々が気づく前に静電気力を打ち消してしまうからである。

電荷は静電気力の担い手であるから、電荷の大きさは力の大きさを用いて定量化する。電荷を定量化して調べた結果、安定な物質で電子の電荷より小さい電荷を持った物質は発見されず、さらに世の中にある全ての電荷の大きさが電子の電荷の大きさの整数倍であることが分かった。

電荷を定量的に表現するための単位はC(クーロン)である。

III. 場

電磁気現象は静電気力や磁力の発見に始まり、静電気力や磁力は物質間に生じる力として観察される。これゆえ、静電気に関連した現象は物質の性質のように思われるかもしれない。しかし、静電気に限らず、電磁気現象は物質のみでなく空間（真空）の性質でもある。広がりのある空間に何らかの働きがある場合、その空間を場(field)と呼ぶ。したがって、電磁気力は場を作る。

A. 電場と磁場

静電気の実験を行うと電荷を持つ（帯電した）物体間に力が働くように見えるが、この現象を見たイギリスのファラデーは、この力が電荷と電荷の間に作用しているのではないことに気づいた。ファラデーによれば、電荷は周囲の空間の性質を変え、性質の変わった空間が別の電荷に力を作用させるのである。電荷によって性質の変わった空間を電場という。従って、電荷はその周囲に電場をつくり、電

場の中に別の電荷をおくと、電場が電荷に力を及ぼす。力には向きと大きさがあるので、電場はベクトル場である。

電場の単位は V/m ($=N/C$) であり、 $Q(C)$ の電荷に電場 $V(V/m)$ が作用すると、その電荷には $F = QV(N)$ の力が作用する。

同様に、磁石が 2 個あると、吸い付いたり退けあったりする。この現象を一方の磁石が周囲の空間の性質を変えて、性質の変わった空間が他方の磁石に力を作用させていると考える。このとき、磁石によって性質の変わった空間のことを磁場という。

磁場の単位は T (テスラ) である。磁場の定量的記述は、後述する。

B. なぜ、場という概念が必要なのか

電場・磁場という概念に対する上述の説明では、電荷同士・磁石同士に力が働くことを、場という分かりにくい概念を用いて難しく言い換えただけで、新しいことが無いように思われるかもしれないが、そうではない。電場や磁場は空間の持つ性質であり、電荷が無くても電場は単独で存在し、磁石がなくても磁場は単独で存在する。

電場や磁場は発生源とは独立に存在でき、空間の性質であることを示すため、例として電磁石を用いた実験を考えよう。電磁石 A に電流を流すと電磁石 A から磁場が生じ、別の磁石 B に力を及ぼす。磁石 B に作用する力を測定しながら、ある瞬間に電磁石 A の電流を切ったとしよう。電流を切った瞬間に電磁石 A は磁石でなくなる。ところが、実際にこの実験を行うと磁石 B にはしばらく力が作用し続ける。この現象は、電磁石 A と磁石 B が直接力を及ぼしあっていると考えると説明できない。しかし、磁場は空間の持つ性質であるとすれば簡単に説明できる。

電磁石 A に電流を流すと、周囲に磁場が作られ、磁石 B に力を及ぼす。電磁石 A は電流を切るともはや磁石ではないが、周囲に磁場が残る。残された磁場は電磁石 A の周囲から徐々に消えてゆき (波のように伝わっていくことで消える)、有限の時間を経たないと、磁石 B の周囲の磁場 (電磁石 A によって作られた磁場) が消え、力が作用しなくなる。磁場は磁石や電流から生じるが、磁石や電流と独立した空間の性質である。

このように、電荷や磁石の大きさや位置が時間変化する場合には、場という概念を用いないと説明できない現象がある。身近な時間変化する電場・磁場としては電磁波がある。電磁波は、発生源である電荷や磁石が消滅しても空間を伝搬する。たとえば、懐中電灯や星から発せられた光 (電磁波の一種) は、発生源が消滅しても宇宙空間をどこまでも伝搬していく。

C. 重力場

重力は、質量を持つ物体間に作用する力のように見えるが、静電気力や磁力のように空間の性質である。場という概念を用いると重力は、質量を持つ物体が周囲の空間の性質を変え、性質の変わった空間が別の質量に力を及ぼすとして理解する。質量を持った物体に力を及ぼすように変化した空間のことを重力場という。たとえば、地球は質量を持っているので、地球の周辺の空間は質量に力を及ぼすように変化している。地上で生活する我々が下方に引っ張られているように感じるのは、地球周辺の重力場が我々のような質量を持つ物体に力を及ぼしているからである。

重力場という概念も電場・磁場と同様に、場の発生源が静止している場合には必要なく、質量どうしが直接力を及ぼし合っていると考えると結果は同じである。しかしなが

ら重力源が変化する場合 (質点が運動している場合) には違う。太陽の周囲を公転する地球を考えてみる。ケプラーの法則に従って、楕円軌道を描いて地球は公転しているが、ある瞬間に太陽に力を働かせて動かしたとする。すると、その瞬間から重力場は太陽の周囲から外側に向かって変化をはじめ、太陽が移動してから 8 分後に地球の公転軌道が変化し始める。それまでは地球の公転軌道は変化しない。

まとめ： 電場、磁場、重力場は空間の持つ性質で、その発生源である物質とは独立に存在する。場の大きさは特定の性質を持った物質に働く力で定義される。

電場 \vec{E} : 電荷 Q に作用する力 \vec{F} の場;

$$\vec{F} = Q\vec{E}. \quad (1)$$

電荷の単位は C (クーロン) なので、 $1C$ の単位電荷に働く力が $1N$ のとき、電場の大きさを $1N/C=1V/m$ とする。参考：電子の電荷は $-1.6 \times 10^{-19}C$

磁場 \vec{B} : 磁石や電流 I の流れている電線 \vec{L} に作用する力 \vec{F} の場;

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}. \quad (2)$$

$1A$ の電流が流れる $1m$ の電線に働く力が $1N$ のとき、磁場の大きさを $1T$ (テスラ) とする。参考：地球磁場は $0.3 \times 10^{-4}T$ 程度

重力場 \vec{g} : 質量 m に作用する力 \vec{F} の場;

$$\vec{F} = m\vec{g}. \quad (3)$$

$1kg$ の質量を持つ物質に働く力が $1N$ のとき、重力場の大きさを $1N/kg=1m/s^2$ とする。参考：地球の重力場は $9.8m/s^2$ 程度

IV. 光は振動数の高い電磁波

A. 電磁波は電場と磁場が対になって空間を伝搬する波

私たちの住んでいる空間には電場や磁場を作る性質があり、さらに、この場は対になって波として空間を伝搬する。この波のことを、電磁波もしくは電波という。

電磁場は太鼓膜やゴム膜と同じ振る舞いをするので、それらを用いて正確な説明ができる。ゴム膜をピンと張ると、鏡のように平らになる。この状態は磁場や電場の無い空間に対応する。膜を指で押すとへこむ。この状態は、磁石や静電気で変化した空間、すなわち静磁場や静電場のある状態に対応する。膜が大きく変形するほど、大きな場に対応する。

ここで、膜を押している指を振動させてみよう。すると、指の振動は膜全体に波のようになって伝搬していく。同様の現象が磁石や静電気でも生じ、これが電磁波である。電磁波の発生は単純で、磁石や静電気 (電荷) を振動運動させればよい。厳密に言うと、電磁波を発生させるためには、磁石や電荷の速度を変化させる (加速度運動) だけでよい。また、場は空間の持つ性質であり、一度発生してしまえば電荷など場の発生源が消滅しても電磁波は存続できる。

携帯電話で利用しているような電磁波は、電気回路を用いて特定の周波数の交流 (電流の流れる向きが変化する電流) を作り、交流をアンテナに接続することで発生させている。アンテナというのは、アンテナという特別な物があるわけではなく、ただの金属である。金属内には原子核の束縛を離れて自由に動ける自由電子があり、金属に電場を加えると、電場から力を受けて動く。(先に説明したように、電場は電荷に力を及ぼすように変化した空間である。)

交流電圧によって作られた電場は向きが変化するので、金属内の電子に作用する力の向きも変化し、自由電子が加速運動して、電磁波が放射される。

B. 光は振動数の高い電磁波

光は、携帯電話や電子レンジで使われているのと同じ電磁波である。これは真実なのだが、同じようには思えないかもしれない。光と電波との違いは、電磁波の振動数の違いから生じる。携帯電話や電子レンジの磁場や電場は1秒間に10億回(10⁹Hz, 1GHz)の早さで振動し、光の場合は1秒間に千兆回(10¹⁵Hz)の早さで振動している。先に、電磁波の発生は単純で、磁石や電荷を振動運動させればよいと述べたが、手で磁石を持って振動運動させることにより発生できる電磁波は振動数の低い電磁波で、この方法では携帯電話に利用できるような電磁波や、目で見えるような光を発生させることは、振動数が足りないので不可能である。

C. 光は電子と強く相互作用する

光は電場と磁場が対になって伝搬する電磁波であり、電子は電荷を持っているので、光と電子は強く相互作用する。実際、身の周りのほとんどの物には色が付き不透明である。色が付いたり不透明と言うことは、物質内の電子が光を吸収して、光以外のエネルギー(ほとんどの場合、熱)に変えているということである。ガラスや水は透明なので光と相互作用していないように思えるかもしれないが、実際には相互している。透明な物質の屈折率はほとんどの場合1より大きく、ガラス表面で光が反射する。屈折率が1より大きいということは、光速が真空中より遅いということである。透明な物質中の電子は光のエネルギーを一瞬ではあるが吸収して溜めて、その後放出する働きがある。このため、光の伝搬速度が遅くなる。

金属には、金属特有の光沢があり、平らに研磨すると鏡として機能する。鏡は効率よく光を反射し、綺麗に研磨した金属鏡は光を98%程度反射。その一方、2%の光は綺麗な金属面でも金属に吸収される。わずか2%であるが、吸収された光のエネルギーは電子の運動エネルギーとなり、一部は金属外へ飛び出す。この現象を光電効果という。空気中の金属に光を当てた場合、飛び出した電子は金属表面の酸化物や油に遮られ、すぐに金属にもどるが、真空中の清浄な金属面の場合には、真空中に電子を飛び出させることができ、実際に電流計で電子の流れ(電流)を測定することができる。

V. 波の伝搬のしかた

A. 波は、四方八方へ飛び散りながら伝搬する

波の伝搬の特徴をひとことで言えば、波は想定しうる(エネルギー保存則などを破らない)あらゆる経路に広がる(四方八方へ飛び散る)、言い換えればあらゆる物理現象が同時に生じることである。たとえば、波を波長程度の小さな隙間に照射すると、隙間を通過した波は四方八方へ広がる。この現象は回折と呼ばれ、波の一種である音では顕著で、小さな隙間でも音が進入し、なかなか静かにならない。また、ガラス板に光を照射すれば、光は二つに分かれ反射と屈折が同時に生じる。ところが、ボールなどの物体を壁にぶつけば、跳ね返るか壁を突き破るか、どちらか一方の現象が生じるのみである。四方八方へ散らばり一度にあらゆる状態をとるという波の性質は、データベースの

検索のようにたくさんのデータや状態を調べる情報処理の高速化に適しており、波を用いたコンピュータ(量子コンピュータ)の研究がされている。

このように、四方八方へ飛び散りながら伝搬すると、世界中が波だらけになるように思える。しかし、波には以下に述べるような干渉性があるため、無制限に広がることはない。

B. 光の干渉

波のもう一つの特徴は、プラスの状態とマイナスの状態があり、プラスからマイナス、マイナスからプラスへと変化しながら空間を進行していくことである。プラスとマイナスがあるので、プラスの状態であっても、別な波がマイナスの状態でやってくると打ち消し合い、波が消えてしまう。これを波の打ち消し合いという。ただし、打ち消し合いにより全ての波が消滅することはなく、別な場所では強め合いが同時に生じ、波は強め合いの生じた側へ伝わっていく。このような波の性質を干渉性という。

1. 波の直進は打ち消し合いの結果生じている

広い隙間から差し込む太陽光のように、波長よりも広い隙間を通過した波は、直進する場合がある。上述したように、波は四方八方へ広がりながら伝搬するので、直進性は不可思議な現象である。この例で波が結果的に直進するのは、直進経路以外へ飛び散った波が互いに打ち消し合い、消滅するからである。このことを証明するには、隙間の幅を狭くして、干渉による打ち消し合いを不完全にした場合の波の伝搬を調べればよい。この場合には、先に述べたように回折により波は広がる。

C. 波面が決まる条件と波面の記憶

1. 質点の運動が決まる条件

たとえば、野球ではピッチャーがボールを投げ、バッターが打つ。バッターに来るボールを再現する場合、バッターとピッチャーの間の適当な場所で、ボールの位置と速さを記録し、それを再現すれば、バッターに対してピッチャーが投げたのと同じ軌道を描くボールを再現できる。これは、ニュートンの運動方程式の解が、初期位置と初速度で決まることによる。と同じように、波の波面が決まる条件を考えてみよう。

D. 波面が決まる条件

真空中や空気中の光、空気中の音波のように、波の発生源がない場所における波の伝搬は、波動方程式、

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} \right] E(x, y, z, t) = 0, \quad (4)$$

に従っている。ここで、 c は波の伝搬速度を表す。この方程式は重要な方程式なので、様々な方面から研究が進んでいる。その成果のひとつが、どのような情報があれば解が決まるかということである。結論を言えば、ある点の波の大きさは、その点を含む閉じた領域表面上の波の大きさで決まる。

見るという動作を例にして、もうすこし具体的に説明しよう。私が物を見ることは、空気中を伝搬して私の目に来た光を見ることである。空気中の光の伝搬は波動方程式(4)に従う。先に述べたように、方程式の解の決定条件から、私の所へ来る光は、私を含むような平曲面上の光の電場で決定される。たとえば、窓の外をみると景色が見える。言うまでもないが、窓の外景色は、窓の外から来る光が、この部屋の中に入ることで観測される。しかしながら、先ほど述べた原理に従うと、窓から入ってくるこの部屋の景色は、窓の表面上での光の電場で決められる。

1. 鏡に写る 3次元的な広がりのある像は、金属表面上の電子の 2次元的な運動で作られる精巧な偽物

窓から入り込む光の説明では、あまり意味が判らないかもしれないので、別な例を考えよう。鏡はあらゆる像を映すことができる。また、鏡に映した像は写真と異なり、立体感があり、視点を変えると像の形が変化する。この意味で、実物と鏡像は見ただけでは区別がつかない。

ところで鏡とは、いったい何だろう。鏡は平坦な金属面である。金属中には自由電子と呼ばれる原子核の束縛から離れて自由になった電子があり、光があたると、光の電場から力を受けて電子が動く。この運動は加速度運動なので、電磁波(光)が放射される。ここで放射された光が、いわゆる反射光である。

まとめると、鏡による光の反射は、1:外部から金属に光が入射される、2:金属表面の電子が入射光により振動する、3:振動した金属表面の電子から光が再放射される。この再放射された光が反射光である。

このようにして反射された光(物体からの像)は、本物と区別がつかないくらい精巧で、3次元的な広がりがあるように見える。別な見方をすれば、我々が目で見ている3次元的な広がりのある像は、金属表面上の電子の2次元的な運動で再現できるといえる。

先に述べた、窓から見える景色を再現するために必要な光の情報は、窓ガラスの表面上における光の電場だけで十分であることを納得できただろうか。

2. ホログラフィー

神様は何でもできるということなので、金属表面の電子を自由に動かせるとする。すると、我々が鏡でみている景

色は、本当に鏡に映った景色なのか、神様がいたずらして勝手に変な像を造っているのか区別ができなくなる。このように、金属表面の電子を自由に動かせると、「白雪姫の継母が持っている鏡」のように入射光がなくても電子の運動だけから立体像を得ることができる。同様に、おなじ神様が、窓の外景色とは無関係に窓の表面の光の電場を勝手に作れば、我々は、窓の外に本当にそのような景色があるのか、神様がいたずらしているのか、見ただけでは(光学的方法では)区別できない。

こんな空想めいた話には現実性がないように思うかもしれないが、これは、技術的には確立しており、ホログラフィーと呼ばれる。ホログラムは、写真程度の大きさの半透明な板であり、板の表面上における光のパターンが記録されている。外部から別な光をホログラムへ照射すると、記録した光のパターン(電場分布)が再現される。このとき再現された光によって作られる像には、3次元的な広がりがあり、光を見ているだけでは、ホログラムなのか、ホログラムと同じ大きさの窓から外の景色を見ているのか区別が付かない。ただし、現在の技術上の理由で、鮮明な像をホログラフィーで得ることはできていないので、画質が悪く容易に区別が付く。

写真は、見る角度を変えても、見える像は変わらないけれど、ホログラムによって再現した像は、見る角度を変えれば、隠れた部分を見ることができる。これは、窓越しに景色を眺めるとき、見る位置を少し変えれば、木の陰になっている部分が見えるのと同じである。

ホログラフィーについて難しく説明したが、回折格子にレーザー光を当てると回折によりレーザービームが分かれることと現象としては同じである。回折格子は模様が単純なので、回折した像(数本に分かれたレーザービームのこと)も単純だが、複雑な構造を持った回折格子にレーザー光を当てると、立体像に見えるような回折光が生じると解釈してもよい。

ホログラムと普通の写真との違い 普通の写真は光の強度(波でいうと、振幅の自乗)が記録されているが、ホログラムには光の位相が(細かい明暗や屈折率の変化として)記録されている。このため、見る場所を変えると、干渉の仕方が変わり、異なる画像となる。これゆえ、左右の目で異なる画像が観測され、立体的に見えたり、見る場所を変えると異なる画像になったりする。