本書の構成と利用法

◪ 本書は，これまで筆者が勤務先の予備校の授業で語ってきたこと，試験の解説に書いてきたことを，まとめて全面的に書き直したものである．内容は高校物理全般，つまり力学（波動を含む）・熱学・電磁気学（光学を含む）・現代物理学（前期量子論まで）の基礎的解説である．前３分野はできるだけ演繹的に，現代物理学はその過渡的性格ゆえにいくぶん歴史性を加味して記述した．部分的には高校物理の範囲をやや超えるところもあるが，そこでは欄外にその旨を記しておいたから，読みとばしても差し支えない．数学は微分・積分の範囲まで使っているが，必要なことは欄外に注記しておいた．数学は，物理にとっては便利な道具だと割り切って，食わず嫌いをせず使い慣れてもらいたい．

◪ 何の学問でもそうだが,勉強とは教えられたことを受け身的に覚えることではない．本当に自分のものにするには，自分で主体的に考えなければ，それもうんうん唸って考えなければならない．もちろん物理でもそうだ．その際，物理で考えるということは，実際に手を動かして計算し，その結果をグラフや図に表して吟味し，想像力を働かせて具体的なイメージをかきたてることをいう．したがって，本書を読むときには，目で読むのではなく，紙と鉛筆を用意し，計算はすべて手を動かして実行しなければならないし，その上で，思いついたことも実際にやってみることが大切である．そうすればまた，必要な計算能力もおのずと身につくであろう．

◪ その際，次のことに注意してもらいたい．物理学は，自然科学として現実的自然を扱うが，同時に数理科学として論理的な体系を有している．それゆえ，何からも導かれない出発点としての原理と，約束事としての定義と，それらから導き出される法則，および自然的事実としての物の性質を区別した上で，その関係を理解せねばならない．例えば「極板面積 S，極板間隔 d の平行板コンデンサーの容量が $C=\varepsilon_0 S/d$」であることを知っているとはどういうことかを考えてみよう．

◪ そのためには，電場が何でありかつ電荷がいかなる電場を生み出すのかという電磁気学の原理の認識，および金属とはどういうもので，金属を帯電させたとき電荷はどのように分布するかという物の性質についての知識，加えて，この場合の具体的な電荷分布が作る電場を原理から導き出すことのできる計算能力と，作られた電場についての明確なイメージ，さらに電場を記述する手段としての電位という抽象的概念の正確な理解，これだけを踏まえ，電荷を蓄えておくものとしてのコンデンサーにとって，その電荷を蓄える能力の指標としての「容量」概念導入の必然性の把握を必要とする．

◪ そのときはじめて，物理学が厳密な概念で操作し，一個の体系をもち，しかも現実の自然と密接にかかわる学問であることが，ほの見えてくるであろう．一口で言うなら，結果を丸暗記するのではなく，そこに至る過程とそれが表す物理的現実を理解することが大切なのだ．本書は，そういう意味での物理の理解に資するように書いたつもりである．時には忍耐を強いることもあろうが，最後まで付き合っていただきたい．

目　　次

2－1　運動学——運動の記述のしかた

力学的物体

力学は，力の作用のもとでの物体の運動を求めること，あるいは逆に，物体の運動からその物体に働いている力を求めることを目的とする．ここに，力学でいう物体とは，質量や電荷のほかには，幾何学的形状・大きさ，および位置変化としての運動の能力のみをもつものである．つまり赤いとか青いとか熱いとか冷たいというようなことは力学的物体にとってはどうでもよいことなのである．なお，物体は質量（慣性質量）をもつことにより運動状態を持続しようとする性質——慣性——をもち，また質量（重力質量）と電荷をもつことにより，他の物体に力を及ぼし，また他の物体から力を受ける能力をもつ．

質　点

どんな学問も単純なものから話を始めるのがわかりやすい．そこで，物体のなかで最も単純なものとして，大きさが小さくなった極限としての「質点」を考える．現実の物体はすべて何ほどかの大きさをもつ．したがって，「質点」とは現実にはないきわめて抽象的な概念である．しかし，問題の設定において物体の大きさが無視しうるかぎりで，それを「質点」と扱うことが許される，つまり「質点」という抽象的な概念を十分よい近似として適用することができるのである．

たとえば，地球は直径約10^7m という——われわれの日常的感覚では——巨大な物体だが，太陽のまわりの公転を論じる場合には，大きさを無視し地球を「質点」とみなしても十分よく現実を表すことができる．もちろん，自転を論じる場合には，その同じ地球を大きさのある球とみなさねばならない．逆に，ヘリウム原子というのは，大きさが10^{-10}m というようなきわめて小さな存在で，ヘリウム気体が容器の壁に及ぼす

大きさの程度（order）

銀河系の直径	10^{21}
地球—太陽間	10^{11}
地球の直径	10^{7}
人間	$1=10^{0}$
赤血球の直径	10^{-5}
原子の直径	10^{-10}
原子核	10^{-15}

（単位はm）

圧力を論じるときはもちろん「質点」とみてよいが，他方，その発光現象を扱うときには，その内部構造と大きさを無視することはできない．要するに，同一の物体に対しても何を問題にするかに応じて，「質点」とみなすことができたりできなかったりするのである．

◪ 位置ベクトル

質点の位置は，選択された座標系に対して

位置ベクトル：$\boldsymbol{r}(t)=(x(t),\ y(t),\ z(t))$　(2-1)

で指定される．これはまた，x，y，z 各方向の単位ベクトル（長さ1のベクトル）$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{k}$ を用いて

$$\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k} \qquad (2\text{-}1)'$$

とも表される（図2･1）．力学では物体の運動（位置の時間変化）を問題にするので，$\boldsymbol{r}$ が時刻 t の関数であることを明記しておいた．

なお，物体の大きさが無視できないときでも，回転や変形などがなく物体のすべての点が同一の運動をするときには，物体全体を単一の質点と同様に扱うことができ，この場合には物体の位置は適当な代表点——たとえば重心——の位置ベクトルによってまったく同様に表すことができる（後述§2-14参照）．

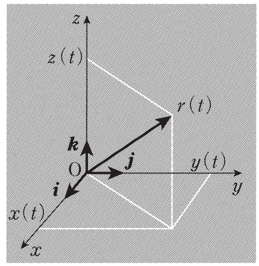

図2･1　位置ベクトル

$\boldsymbol{i}=(1,\ 0,\ 0)$
$\boldsymbol{j}=(0,\ 1,\ 0)$
$\boldsymbol{k}=(0,\ 0,\ 1)$

本書ではボールド・タイプ（太字）はベクトルを表す．

◪ 速度と変位（1次元運動の場合）

運動状態を表す物理量の一つとして **速度** を定義する．はじめに簡単のために1次元（x軸上）の運動——$\boldsymbol{r}(t)=(x(t),\ 0,\ 0)$——を考える．図2･2の太い線が位置 x の時間変化を表すとしよう．図で，時刻 t の点Pと時刻 $t'=t+\Delta t$ の点Qを結んだ線分の傾き

$$\overline{v(t)}=\frac{x(t')-x(t)}{t'-t}=\frac{x(t+\Delta t)-x(t)}{\Delta t} \qquad ①$$

を t と $t'(=t+\Delta t)$ の間の **平均速度**，そして，$t'\to t$ $(\Delta t\to 0)$ とした極限，つまりPでの接線PRの傾き

$$v(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{x(t+\Delta t)-x(t)}{\Delta t}=\frac{dx(t)}{dt} \qquad (2\text{-}2)$$

を時刻 t での **速度** とよんでいる．

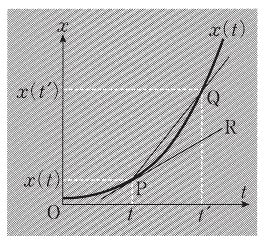

図2･2　1次元の運動と速度

力学では通常 t を独立変数，x，y，z を共に t の関数と考える．

これは（1次元の場合の）速度の定義であり，同時に位置座標 x の変化から速度 v を求める式でもある．

逆に速度 v から座標 x の変化（変位）を求めるには次のようにすればよい．

微小時間 $t \sim t+\Delta t$ の間の移動量（変位）は，①より

ただし②では $\Delta t \to 0$ で $\fallingdotseq \to =$.

$$x(t+\Delta t)-x(t)=\overline{v(t)}\Delta t \fallingdotseq v(t)\Delta t. \qquad ②$$

有限時間 $t=0\sim t$ の間の変位を求めるために $0\sim t$ 間を n 等分し $\Delta\tau=\dfrac{t}{n}$ とおき，$\tau_k=k\Delta\tau$ とする．このとき $\tau_0=0$，$\tau_n=t$，$\tau_{k+1}=\tau_k+\Delta\tau$.

そこで②式を $t=\tau_k$ について書くと

$$x(\tau_{k+1})-x(\tau_k)=x(\tau_k+\Delta\tau)-x(\tau_k)\fallingdotseq v(\tau_k)\Delta\tau$$
$$=\text{図2·3 の黒い短冊の面積}$$

これを $k=0$ から $k=n-1$ まで足す：

$$\begin{array}{ll}
k=0: & x(\tau_1)-x(\tau_0)\fallingdotseq v(\tau_0)\Delta\tau \\
k=1: & x(\tau_2)-x(\tau_1)\fallingdotseq v(\tau_1)\Delta\tau \\
 & \cdots\cdots\cdots \\
k=n-1: & x(\tau_n)-x(\tau_{n-1})\fallingdotseq v(\tau_{n-1})\Delta\tau \quad (+ \\
\hline
 & x(\tau_n)-x(\tau_0) \quad \fallingdotseq \underbrace{\sum_{k=0}^{n-1} v(\tau_k)\Delta\tau}_{\text{図2·3の影の部分の面積}}
\end{array}$$

ここで $\tau_n=t$ を一定にして，$n\to\infty$，$\Delta\tau=t/n\to 0$ とすると，

$$x(t)-x(0)=\underbrace{\lim_{\Delta\tau\to 0}\sum_{k=0}^{n-1} v(\tau_k)\Delta\tau=\int_0^t v(\tau)\,d\tau}_{\text{図2·4の影の部分の面積}} \qquad ③$$

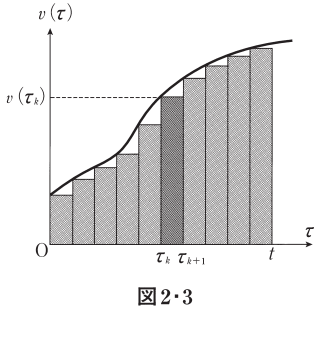

図2·3

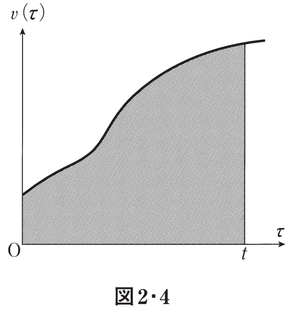

図2·4

数学的に言うと $v(t)$ は $x(t)$ を時間 t で微分したものであるから，逆に v から x を求めるには積分すればよく

$$\int_0^t v(\tau)d\tau = \int_0^t \frac{dx}{d\tau}d\tau = \int_{x(0)}^{x(t)} dx = x(t) - x(0)$$

として，ただちに③が求まる．

速度と変位（3次元の場合）

3次元の場合もまったく同様で，図2･5において

$$\overline{\boldsymbol{v}} = \frac{\boldsymbol{r}(t') - \boldsymbol{r}(t)}{t' - t} = \frac{\boldsymbol{r}(t+\Delta t) - \boldsymbol{r}(t)}{\Delta t}$$

を t と t' の間の **平均速度**，$t' \to t\ (\Delta t \to 0)$ の極限

$$\boldsymbol{v}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\boldsymbol{r}(t+\Delta t) - \boldsymbol{r}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (2\text{-}2)'$$

を時刻 t での **速度** という．もちろんこれはベクトルで

$$\boldsymbol{v} = \left(\frac{dx}{dt},\ \frac{dy}{dt},\ \frac{dz}{dt} \right) = (v_x,\ v_y,\ v_z)$$

と表され，図のように軌道の接線方向を向いている．

この場合も速度から同じように変位が求まる．

つまり各成分毎に③が成り立つ：

$$x(t) - x(0) = \int_0^t \frac{dx}{d\tau}d\tau = \int_0^t v_x(\tau)d\tau,$$

$$y(t) - y(0) = \int_0^t \frac{dy}{d\tau}d\tau = \int_0^t v_y(\tau)d\tau,$$

$$z(t) - z(0) = \int_0^t \frac{dz}{d\tau}d\tau = \int_0^t v_z(\tau)d\tau,$$

これはベクトルを用いてひとまとめに

$$\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{r}(0) = \int_0^t \frac{d\boldsymbol{r}(\tau)}{d\tau}d\tau = \int_0^t \boldsymbol{v}(\tau)d\tau \qquad ④$$

と表される．速度から得られるのは **位置** $\boldsymbol{r}(t)$ ではなく **変位** $\boldsymbol{r}(t) - \boldsymbol{r}(0)$ であることに注意．

加速度

力学では，速度が一定の状態（$\boldsymbol{v}$ ＝定ベクトル）を保っているとき，すなわち等速度運動のとき，物体は一定の運動状態にあるという．したがって，静止も $\boldsymbol{v}=0$ の運動状態と考える．その意味で力学では，等

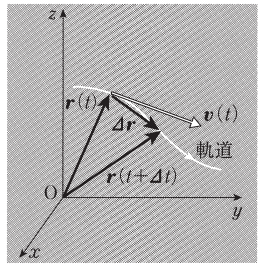

図2･5　3次元の運動と速度

このように，速度はベクトル量（大きさと向きをもつ）である．これに対して

$$|\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

を **速さ** ないし **速度の大きさ** という．

本書ではベクトルは一般にボールド･タイプ（太字）で表すが，ゼロ･ベクトル（各成分がゼロ）だけはわずらわしいので，単に0と書く．

速度運動と静止状態はともに運動の変化が見られず，本質的な差はない．

裏返せば，状態の変化とは速度の変化があることを指す．したがってその変化の割合を表す物理量が必要である．そこで

もちろん (2-2) と同様に
$$\frac{d\boldsymbol{v}(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\boldsymbol{v}(t+\Delta t) - \boldsymbol{v}(t)}{\Delta t}$$

加速度：
$$\boldsymbol{a}(t) = \frac{d\boldsymbol{v}(t)}{dt} = \left(\frac{dv_x}{dt},\ \frac{dv_y}{dt},\ \frac{dv_z}{dt} \right) = \frac{d^2\boldsymbol{r}(t)}{dt^2} = \left(\frac{d^2x}{dt^2},\ \frac{d^2y}{dt^2},\ \frac{d^2z}{dt^2} \right) \tag{2-3}$$

を定義する．これは一般に時刻 t の関数である．

注意！　1次元の運動で v とか a とかと書いたときには，その v や a がベクトルの成分――正負の値をとりうる――なのか，絶対値（大きさ）なのかを頭の中ではっきりと区別しておかなければならない．

とくに1次元の場合

1次元の運動（運動の方向に x 軸をとる）の場合は

$\boldsymbol{r} = (x,\ 0,\ 0)$

$\boldsymbol{v} = (v,\ 0,\ 0)$

$\boldsymbol{a} = (a,\ 0,\ 0)$

として，速度と加速度は

$$v = \frac{dx}{dt}, \qquad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

のように与えられる．これはベクトルの成分であるから，たとえば，実際に $+x$ 方向に動いているときには $v>0$，$-x$ 方向に動くときには $v<0$ となる．

加速度から速度と位置を求める

加速度 $\boldsymbol{a}(t)$ と速度 $\boldsymbol{v}(t)$ の関係（2-3）は速度と座標の関係（2-2)′ とまったく同じゆえ，④と同様に有限時間の速度変化は

前頁では積分変数 τ と積分の上限 t を区別したが，以下では誤解がないと思われるので，同じ文字 t を用いる．

$$\int_0^t \boldsymbol{a}(t)dt = \int_0^t \frac{d\boldsymbol{v}(t)}{dt} dt = \boldsymbol{v}(t) - \boldsymbol{v}(0). \qquad ⑤$$

計算は置換積分の公式を用いて

$$\int_0^t \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} dt = \int_{v(0)}^{v(t)} d\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(t) - \boldsymbol{v}(0)$$

と考えてもよい．これより，初速 $\boldsymbol{v}(0)$ がわかっていれば任意の時刻 t の速度

ここでも積分 $\int_0^t \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} dt$ は，$\boldsymbol{v}(t)$ が原始関数だから
$$\int_0^t \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} dt = \Big[\boldsymbol{v}(t) \Big]_0^t = \boldsymbol{v}(t) - \boldsymbol{v}(0)$$
と考えてもよい．