新稿 物理学概説

上巻

京都産業大学教授　理博
京都大学名誉教授
多田政忠 編

学術図書出版社

新　稿

物理学概説

上　巻

京都大学名誉教授　多田政忠
前京都大学教授　丹羽進
京都大学名誉教授　三谷健次
京都大学名誉教授　竹山幹夫
京都大学名誉教授　川井孝夫
京都大学名誉教授　喜多秀次
京都大学名誉教授　宮武義郎
京都大学教授　徳岡善助
京都大学教授　木方洋

共　著

学術図書出版社

著者承諾
検印省略

1974年 3 月　新稿・第 1 版第 1 刷発行
1977年 3 月　新稿・第 1 版第 7 刷発行
1989年 3 月　新稿・第 1 版第23刷発行

新稿　物理学概説　上巻

定価 1751円
(本体 1700円)

編　者　多 田　政 忠
発行者　発 田 寿 々 子
印刷者　矢 部　富 三

発行所　株式会社 学術図書出版社
東京都文京区本郷 5 丁目 4 の 6
電話 (811) 0889 振替東京 1-28454

三松堂印刷(株)・印刷　☆乱丁・落丁はおとりかえします

はしがき

本書は，大学の自然科学系の学生に対する教科書として編集されたもので上下２巻からなり，上巻の内容は「質点と剛体の力学，変形する物体の力学，熱学，波（光学を含む)」，下巻の内容は「電気磁気学，近代物理学」である．全巻にわたって主として国際単位系または MKSA 単位系を採用している．

編集にあたっては，広く浅きを避け，学生の将来の学習に必要と思われる物理学の基礎的な教材を選んで，これにできるだけ平易な，しかも充分な説明を与え，その物理的意義を徹底させるとともに，応用的な問題や計算問題を解く実力を養成することを目標とした．大学の物理学の授業時間は限られ，本書の教材では多すぎる場合があるかもしれない．本書の中で一応省いても前途の理解にさしつかえないと思われる部分や参考事項などは，小さい活字にしたから，本書を使われる先生方に，適当な取捨選択をお願いする．

本書の旧版は，幸いにも，多くの大学において教科書に採用されてきたがその実地の教授の経験を生かし，また時代の進展に応ずる新しい分野の記述をとり入れるため，今回，全面的に改稿を行なった．改稿にさきだって，これまでに本書を御採用いただいた各大学の先生方に，実地の御教授に基づいて旧版に対する御批判を仰いだところ，多数の貴重な御意見をお寄せいただき感謝にたえない．これらの御意見は改稿に際してできるだけ取入れるように配慮したが，全体のバランスを考えて今回は取入れることができなかったものもある．事情を御了察のうえ御寛容を戴きたい．

今回の改稿においては，各章の執筆者を入れ替えて改善を試みた．さらに旧版と同じように，全執筆者が数十回の編集会議を行なって各執筆者の素稿の章句に到るまで検討を加え，それに基づいて素稿を書換えたものを最終稿とした．それでも執筆者たちの見落しや，思い違いによる不備なところや，なお改良すべき点なども，あろうかと思われる．幸いに，読者の御指摘を受けることができれば，さらに改訂を加えて完璧を期したい．

最後に，本稿の編集に対する諸種の仕事にたずさわり，数十回にわたる編集会議の円滑な実施を可能にしてくれた，京都大学の藤田妙さん，伊川裕子さん，津田彩子さんの3嬢に感謝の意を表する．

昭和49年3月

編　者

再訂4版　はしがき

初版出版以来，これを詳細にわたり検討の結果，誤字および不適当な表現の箇所については直ちに正誤表を配布し，再版においてもこれらを正してきた．

この度，林俊孝先生よりあらたに御懇篤なる御意見，御批判を戴き，これを参考に若干の改訂を加えた．林先生に厚く感謝すると共に，なお多数の読者の御批判，御指摘を受け，本書によって勉学する万余の学生諸君のために完璧を期したい．

昭和50年4月

編　者

目　次

I　質点と剛体の力学

1章　点の運動学

2章　運動の法則

3章　簡単な運動

4章　運動方程式の積分

5章 振　　動

6章 中心力による運動

7章 相対運動

8章 質点系の運動

9章 剛体の運動学

10章　剛体の釣合いと運動

II　変形する物体の力学

1章　固体の弾性

2章　流体の力学

3章　表　面　張　力

III　熱　　学

1章　熱平衡の状態

2章　熱力学の第一法則

3章　熱力学の第二法則

IV　波

1章　波

2章　波としての光

3章　幾何光学

I　質点と剛体の力学

1章　点の運動学

§1　運動の表わし方

物理学の中でとくにIにおいては，物体の位置の時間的な変化，すなわち**運動**を論じたり，その特別な場合として**静止**のための条件を求めたりする．その場合，運動とその原因との関係を論ずる部門を**力学**といい，運動そのものだけを論ずる部門を**運動学**という．

ところで，物体の位置は相対的なもので，他の物体（基準体）があって初めて意味をもつ．よって，物体の位置を表わすには適当な基準体を選ばなければならないが，そこからの距離だけでなく方向も定めるためには，基準体は点状ではなくて大きさをもったものでなければならない．普通はその代わりに座標系，たとえば図1-1のような右手系の直交座標系を用い，点Pの位置はその座標 (x, y, z) で与えられる．

点Pが運動するときは，x, y, z が時間とともに変化する．従って，x, y, z が時刻 t の関数として

$$x=\varphi(t),\quad y=\psi(t),\quad z=\chi(t) \qquad (1\cdot1)$$

の形で表わされると，この点Pの運動が完全に定まる．すなわち，(1·1) のような関数形を求めることが，運動学の主な目的である．

ここで (1·1) から t を消去してみる．その結果，たとえば第1と第2の式から $F(x, y)=0$，第2と第3の式から $G(y, z)=0$ という2つの曲面が得られたとすると，これらの交わりと

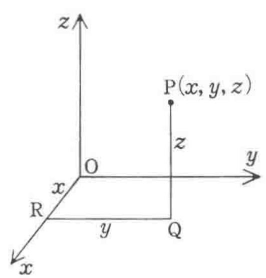

図1-1　直交座標系

して1つの空間曲線が得られる．これが運動の**経路**を表わす曲線の式である．しかし，それは(1·1)に比べて位置の時間的変化の様子がわからず，それだけ運動に関する情報は少い．

§2 変　位

点が運動して，1つの位置Aから他の位置Bに移動するとき，AからBまでの直線距離，その方向および向きをあわせて考え，これを**変位**といい，$\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ で表わす．このさい，その経路，所要時間は問題にしない．

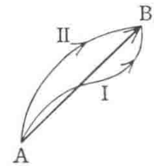

図1-2　変　位

1つの点が，AからBに変位し，つぎにBからCに変位したとすれば，その結果は，直接AからCに移ったのと同じである．このことを

$$\overrightarrow{\mathrm{AC}}=\overrightarrow{\mathrm{AB}}+\overrightarrow{\mathrm{BC}} \tag{2·1}$$

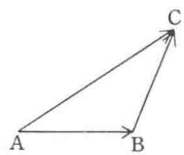

図1-3　変位の合成

で表わし，図では，「$\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ の終点に $\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ の始点をおき，$\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ の始点Aを始点とし，$\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ の終点Cを終点とする変位 $\overrightarrow{\mathrm{AC}}$ を求めればよい．」これを変位の合成に関する**三角形の方法**といい，$\overrightarrow{\mathrm{AC}}$ を $\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ と $\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ との**合成変位**，$\overrightarrow{\mathrm{AB}}$ と $\overrightarrow{\mathrm{BC}}$ とを $\overrightarrow{\mathrm{AC}}$ の**分変位**という．

§3 ベクトル

物理学に現われる量のうちには，質量や温度のように，ただ正負の大きさだけをもつ量がある．これを**スカラー**という．これに対して，変位のように大きさだけでなく，方向や向き*をも合わせて考えねばならない量がある．このような有向量を**ベクトル**という．後に述べる速度，加速度，力などはすべてベクトルである．ベクトルを図で表わすには，変位と同じように，その大きさに比例した長さをもち，その方向および向きに矢印をつけた有向線分で表わす．また，記号で書くときは，肉太文字 $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, または $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\overrightarrow{\mathrm{PQ}}$ な

* とくに必要がないときは，方向，向きを含めて，単に方向という．

どで表わし，その大きさ*には $|\boldsymbol{A}|$, $|\boldsymbol{B}|$ または A, B, $\overline{\mathrm{PQ}}$ などを用いる．

ベクトルは，これまでよく知っているふつうの数（スカラー）と異なる全く新しい数学的量であるから，新しくその演算規則を定義せねばならない．

規則1　**等しいベクトル**　2つのベクトル $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ の大きさ，方向，向きがすべて互いに等しいとき，$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ は互いに等しいという**．式で書けば

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}. \tag{3·1}$$

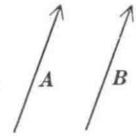

図 1-4
等しいベクトル

図で表わしたときには有向線分の位置が異なっていても，平行であればよい．すなわち，ベクトルは平行にずらせて，任意の点にもっていってよい．

定義　**ゼロ・ベクトル**　大きさが0であるベクトル $\boldsymbol{A}$ をゼロ・ベクトルといい，$\boldsymbol{A}=0$ と表わす．このさい，その方向，向きは任意である．

規則2　**ベクトルの加法**　2つのベクトル $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ を三角形の方法で合成してベクトル $\boldsymbol{C}$ が得られたとき，$\boldsymbol{C}$ を $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ の**和**または**合ベクトル**といい

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A}+\boldsymbol{B} \tag{3·2}$$

と表わす．逆に，$\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ を $\boldsymbol{C}$ の**分ベクトル**という***．

図 1-5 からわかるように，順序を変更して $\boldsymbol{B}$ に $\boldsymbol{A}$ を加えても，同じ合ベクトル $\boldsymbol{C}$ が得られる．

すなわち，

$$\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A}+\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}+\boldsymbol{A} \tag{3·3}$$

となり，**交換の法則**が成り立つ****．

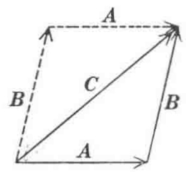

図 1-5　ベクトルの和

---

*　ベクトルの大きさは，正またはゼロとして，負は考えない．

**　後に述べるように，ベクトルのモーメントのような量を考えるときには，$\boldsymbol{A}$ と $\boldsymbol{B}$ の始点の位置が勝手であると，これだけでは必ずしもその効果が等しいとはいえない．

***　「ベクトルとは，三角形の方法で合成される有向量である」というのが，より正確な定義である．

****図 1-5 から，明らかに $\boldsymbol{C}$ は $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ の作る平行四辺形の対角線の1つになっている．従って，「2つのベクトル $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ を合成するのに，1つの点を始点として $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ をかき，それらを2辺とする平行四辺形の対角線を作ってもよい.」これを**平行四辺形の方法**という．

つぎに，図1-6からわかるように

$$(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})+\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}+(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C}). \qquad (3\cdot4)$$

すなわち，ベクトルの加法に対し，ふつうの数と同じ**結合の法則**が成り立つ．従って，括弧は必要でなく，単に

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C} \qquad (3\cdot5)$$

で表わす．

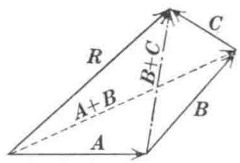

図1-6　ベクトルの結合

同様に，多くのベクトル $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, ……を合成するには，$\boldsymbol{A}$の終点を始点として$\boldsymbol{B}$を，$\boldsymbol{B}$ の終点を始点として $\boldsymbol{C}$ を，と以下同様にして，つぎつぎにベクトルを書き，最初のベクトル $\boldsymbol{A}$ の始点を始点とし，最後のベクトルの終点を終点とするベクトル $\boldsymbol{R}$ を描けばよい（図1-7）．

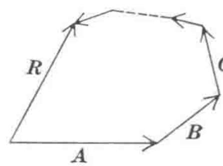

図1-7　多くのベクトルの結合

これを $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, …… の**合ベクトル**といい，

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C}+\cdots\cdots \qquad (3\cdot6)$$

と表わす．これを**多角形の方法**という．

定義　**負ベクトル**　　ベクトル $\boldsymbol{A}$ と大きさ，方向が互いに等しく，向きが逆なベクトルを $\boldsymbol{A}$ の負ベクトルといい，$-\boldsymbol{A}$ と表わす．

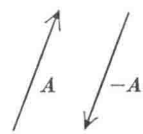

図1-8　負ベクトル

規則3　**ベクトルの減法**　　$\boldsymbol{A}$ から $\boldsymbol{B}$ を引くことは，$\boldsymbol{A}$ に $-\boldsymbol{B}$（$\boldsymbol{B}$ の負ベクトル）を加えることであると定義する（図1-9）．すなわち，

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}+(-\boldsymbol{B}). \qquad (3\cdot7)$$

そして，$\boldsymbol{C}$ を $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ の**差ベクトル**という．

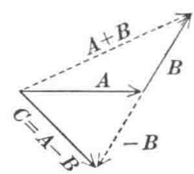

図1-9　ベクトルの差

規則4　**ベクトルとスカラーとの積**　　ベクトル$\boldsymbol{A}$の大きさAの$|n|$倍の大きさをもち，$\boldsymbol{A}$と同じ方向で，nの正負によって$\boldsymbol{A}$と同じ向き，または反対の向きをもつベクトルを $n\boldsymbol{A}$，または $\boldsymbol{A}n$ とかき，これをベクトル $\boldsymbol{A}$ とスカラー n との積という．これには，つぎの関係が成り立つ．

$$nm\boldsymbol{A} = n(m\boldsymbol{A}) = m(n\boldsymbol{A}) = mn\boldsymbol{A}, \quad (n,\ m：スカラー)$$

$$n(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}) = n\boldsymbol{A}+n\boldsymbol{B}, \qquad (m+n)\boldsymbol{A} = m\boldsymbol{A}+n\boldsymbol{A}. \tag{3·8}$$

定義 **単位ベクトル** $\boldsymbol{A}$と同じ方向と向きとをもち，単位の大きさをもつベクトル$\boldsymbol{e}_A$を$\boldsymbol{A}$方向の単位ベクトルと呼べば

$$\boldsymbol{A} = |\boldsymbol{A}|\boldsymbol{e}_A = A\boldsymbol{e}_A, \qquad \boldsymbol{e}_A = \boldsymbol{A}/A. \tag{3·9}$$

スカラー部分Aは$\boldsymbol{A}$の大きさを，ベクトル部分$\boldsymbol{e}_A$は$\boldsymbol{A}$の方向，向きを表わすものとみられる．

なお，2つのベクトル$\boldsymbol{A}$と$\boldsymbol{B}$との積を決める規則は，つぎの§で述べる．

定義 **ベクトルの成分** $\boldsymbol{A}$を，これと角θをなす方向$\boldsymbol{s}$のうえに正射影した線分を，$\boldsymbol{A}$の$\boldsymbol{s}$方向における**成分**といい，A_sで表わす．すなわち

$$A_s = A\cos\theta. \tag{3·10}$$

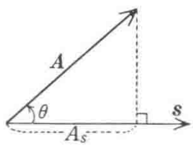

図 1-10 ベクトルの成分

成分 A_sはスカラーであって，θが鋭角ならば正，鈍角ならば負の値をもつ．

従って，図 1-11 において，ベクトル$\boldsymbol{A}$の座標成分は

$$A_x = A\cos\alpha, \qquad A_y = A\cos\beta, \qquad A_z = A\cos\gamma \tag{3·11}$$

となる．ただしα, β, γはベクトル$\boldsymbol{A}$がx, y, z軸となす角である．逆に

$$\begin{aligned} &A = \sqrt{A_x{}^2+A_y{}^2+A_z{}^2}, \\ &\alpha = \cos^{-1}\frac{A_x}{A}, \qquad \beta = \cos^{-1}\frac{A_y}{A}, \qquad \gamma = \cos^{-1}\frac{A_z}{A} \end{aligned} \tag{3·12}$$

となるから，「ベクトルのx, y, z成分は，そのベクトルが与えられると確定し，逆にx, y, z成分が与えられると，ベクトル（大きさ，方向，向き）が決定される.」すなわち，ベクトルとその成分の組とは全く同等であって成分に分けることによって，ベクトルを解析的に扱うことができる．

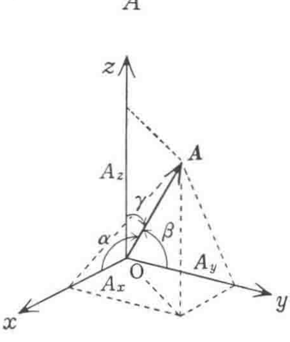

図 1-11 ベクトルのx, y, z成分

例えば，図 1-12 によって明らかなように，

$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}$ であるとき，任意の $\boldsymbol{s}$ 方向の成分に対して

$$C_s=A_s+B_s. \qquad (3\cdot13)$$

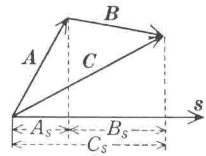

図 1-12 合ベクトルの成分

従って，x, y, z 方向に対しても

$$C_x=A_x+B_x, \quad C_y=A_y+B_y, \quad C_z=A_z+B_z. \qquad (3\cdot14)$$

直交 x, y, z 軸方向の単位ベクトルを $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ と書き，これを**基本ベクトル**という．任意のベクトル $\boldsymbol{A}$ は，基本ベクトルと座標成分とから

$$\boldsymbol{A}=A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k} \qquad (3\cdot15)$$

と表わされる．

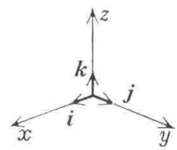

図 1-13 基本ベクトル

従って，$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}$ のとき，$\boldsymbol{A}=A_x\boldsymbol{i}+A_y\boldsymbol{j}+A_z\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{B}=B_x\boldsymbol{i}+B_y\boldsymbol{j}+B_z\boldsymbol{k}$, $\boldsymbol{C}=C_x\boldsymbol{i}+C_y\boldsymbol{j}+C_z\boldsymbol{k}$ を代入し，両辺の $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ の係数を比べると

$$C_x=A_x+B_x, \quad C_y=A_y+B_y, \quad C_z=A_z+B_z$$

を得て，(3·14) と一致する．

例題 1 Oxy 座標系と，これを原点のまわりに時計の針と反対向きに角 θ だけ回転した座標系 O$\xi\eta$ とがある．ベクトル $\boldsymbol{A}$ の x, y 成分 (A_x, A_y) と，同じベクトルの ξ, η 成分 (A_ξ, A_η) との間の関係式を求めよ．

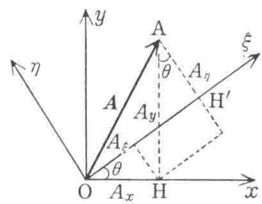

図 1-14 ベクトルの座標変換

解 原点 O を始点としたベクトル $\boldsymbol{A}$ の終点 A から，x, ξ 軸に垂線を下し，足をそれぞれ H, H′ とすると，

$$A_x=\mathrm{OH}, \quad A_y=\mathrm{HA}, \quad A_\xi=\mathrm{OH'}, \quad A_\eta=\mathrm{H'A}$$

で，図から明らかに

$$A_\xi=A_x\cos\theta+A_y\sin\theta, \quad A_\eta=-A_x\sin\theta+A_y\cos\theta. \qquad (3\cdot16)$$

また，これを逆に解いて

$$A_x=A_\xi\cos\theta-A_\eta\sin\theta, \quad A_y=A_\xi\sin\theta+A_\eta\cos\theta. \qquad (3\cdot17)$$

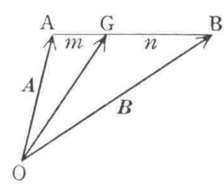

図 1-15

例題 2 同じ点 O を始点とする 2 つのベクトル $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ の終点 A, B を結ぶ線分を $m:n$ に内分する点を G とするとき，ベクトル $\overrightarrow{\mathrm{OG}}$ を $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}$ で表わせ．