
新稿 物理学概説

上 卷

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 卷

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
京都大学教養	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としや、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

§ 1	運動の表わし方	1	§ 6	加速度の接線成分と 法線成分	13
§ 2	変 位	2	§ 7	極座標による運動 の表わし方	15
§ 3	ベクトル	2	1章	演習問題	18
§ 4	ベクトルとベクトルとの積	7			
§ 5	速度と加速度	9			

2章 運 動 の 法 則

§ 1	運動の原因, 質点	19	§ 5	運動の第三法則	25
§ 2	運動の第一法則	20	§ 6	慣性質量と重力質量	26
§ 3	質量と力	20	§ 7	単位と次元	27
§ 4	運動の第二法則と 運動方程式	22	§ 8	絶対単位系と重力単位系	29
			2章	演習問題	29

3章 簡 単 な 運 動

§ 1	放物体の運動	30	§ 4	Atwood の機械	35
§ 2	摩擦と束縛運動	31	3章	演習問題	36
§ 3	斜面の上の運動	33			

4章 運動方程式の積分

§ 1	運動量保存の法則, 力積	37	§ 4	エネルギー保存の法則	45
§ 2	仕事, エネルギーの定理, 運動エネルギー	38	§ 5	角運動量及びその保存の 法則	46
§ 3	保存力, 位置エネルギー, ポテンシャル	41	4章	演習問題	47

5 章 振 動

§ 1 単 振 動	48	§ 6 連成振動	60
§ 2 単振り子	50	§ 7 電磁場内における荷電 粒子の運動	62
§ 3 単振動の合成	52	5 章 演習問題	63
§ 4 減衰振動	56		
§ 5 強制振動	58		

6 章 中心力による運動

§ 1 中 心 力	65	§ 4 万有引力による運動 (惑星 と彗星の運動)	70
§ 2 惑星の運動	65	6 章 演習問題	71
§ 3 万有引力の法則	67		

7 章 相 対 運 動

§ 1 相対運動	73	座標系	76
§ 2 慣性系, 並進座標系に おける運動方程式	74	§ 4 地球の自転による Coriolis 力	79
§ 3 遠心力, 平面上の回転		7 章 演習問題	80

8 章 質 点 系 の 運 動

§ 1 内力と外力	82	§ 5 エネルギーの定理とエネ ルギー保存の法則	87
§ 2 質量中心	83	§ 6 2つの質点の衝突および 散乱	89
§ 3 運動量の定理, 質量中心 の運動, 運動量保存の 法則	84	§ 7 Rutherford (ラザフォ ード) 散乱	93
§ 4 角運動量の定理, 角運動 量保存の法則	86	8 章 演習問題	95

9 章 剛 体 の 運 動 学

§ 1 剛 体	98	§ 3 剛体の平面運動	99
§ 2 剛体の自由度と特殊な運 動	98	9 章 演習問題	102

10 章 剛体の釣合いと運動

§ 1 剛体の運動方程式	103	§ 6 複振り子	113
§ 2 剛体に作用する力系と剛体の釣合い	104	§ 7 剛体の平面運動	114
§ 3 仮想仕事の原理	107	§ 8 剛体の衝撃運動	117
§ 4 固定軸のまわりの剛体の回転運動	109	§ 9 1つの点を固定した剛体の回転運動	118
§ 5 慣性モーメント	111	10章 演習問題	121

II 変形する物体の力学

1 章 固体の弾性

§ 1 均質と等方	123	§ 8 弾性定数	133
§ 2 弾性と塑性	123	§ 9 弾性定数の相互の関係	135
§ 3 応力	124	§ 10 弾性エネルギー	137
§ 4 ずれ応力	127	§ 11 たわみ(撓み)	138
§ 5 歪み	128	§ 12 ねじれ(捩れ)	142
§ 6 ずれ歪み	129	1章 演習問題	144
§ 7 応力と歪みとの関係	130		

2 章 流体の力学

§ 1 静止流体の中の応力	145	定理	157
§ 2 圧力の分布, 自由表面	146	§ 9 縮む流体の流れ	159
§ 3 大気の大気圧	148	§ 10 粘性	161
§ 4 流線と定常流	150	§ 11 流れの中にある物体の受ける抵抗	164
§ 5 連続の式	151	§ 12 揚力	168
§ 6 Bernoulli の定理	151	2章 演習問題	170
§ 7 Bernoulli の定理の応用	154		
§ 8 定常流に対する運動量の			

3章 表 面 張 力

§ 1 表面張力と表面エネルギー	§ 3 接 触 角
ギ一	174
172	§ 4 液体の表面の曲率と圧力
§ 2 表面張力の微視的な	175
考え方	§ 5 毛管現象
173	177
	3章 演習問題
	178

III 熱 学

1章 熱 平 衡 の 状 態

§ 1 温 度	§ 6 Van der Waals の状態
180	方程式
§ 2 状態方程式	192
183	§ 7 平均自由行程
§ 3 分子運動論の立場	193
187	§ 8 Maxwell の速度分布則
§ 4 理想気体の圧力	195
188	1章 演習問題
§ 5 温度の微視的解釈	198
190	

2章 熱力学の第一法則

§ 1 熱素説とエネルギー保存	ギ一
の法則の成立	206
199	§ 6 理想気体の比熱と等温変
§ 2 熱力学の第一法則	化, 断熱変化
200	208
§ 3 準静的過程と圧力のなす	§ 7 Joule-Thomson 効果
仕事	214
202	§ 8 輸送現象
§ 4 比 熱	216
205	2章 演習問題
§ 5 理想気体の内部エネルギー	220

3章 熱力学の第二法則

§ 1 熱と仕事	§ 6 熱力学的温度
222	234
§ 2 Carnot のサイクル	§ 7 Clausius の不等式
223	235
§ 3 熱力学の第二法則	§ 8 エントロピー
227	237
§ 4 可逆過程と不可逆過程	§ 9 エントロピー増大の
229	原理
§ 5 Carnot の定理	239
231	

§ 10 エントロピーの微視的 解釈	242	§ 11 自由エネルギー	245
		3 章 演習問題	248

IV 波

1 章 波

§ 1 波	249	§ 6 うなり, 群速度	263
§ 2 波動方程式	251	§ 7 音	265
§ 3 波のエネルギーと強さ	254	§ 8 発音体の振動	267
§ 4 同じ周波数の波の合成	256	§ 9 Doppler 効果	269
§ 5 波の反射と透過	259	1 章 演習問題	271

2 章 波としての光

§ 1 光の速さ	272	§ 7 回折格子の分解能	291
§ 2 光の本性	275	§ 8 光学器械の分解能	293
§ 3 光の干渉	278	§ 9 偏 光	295
§ 4 薄い膜の干渉	280	§ 10 光と電磁場	301
§ 5 光の回折	283	2 章 演習問題	302
§ 6 回折格子	287		

3 章 幾 何 光 学

§ 1 幾何光学と波動光学	305	§ 5 光の分散	318
§ 2 薄いレンズ	307	§ 6 ホログラフイー	322
§ 3 厚いレンズ	312	3 章 演習問題	324
§ 4 レンズの球面収差	315		

演習問題 解答	325
和英対訳 索引	349
索 引	359

物理定数表.....	卷末
------------	----

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

$$x = \varphi(t), y = \psi(t), z = \chi(t) \quad (1.1)$$

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

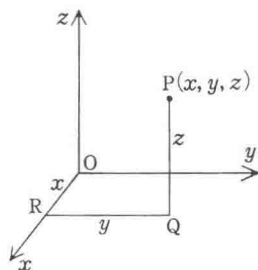


図 1-1 直交座標系

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、 $\overrightarrow{AB}$ で表わす。このさい、その経路、所要時間は問題にしない。

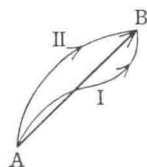


図1-2 変 位

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

$$\overrightarrow{AC} = \overrightarrow{AB} + \overrightarrow{BC} \quad (2 \cdot 1)$$

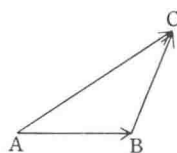


図1-3 変位の合成

で表わし、図では、「 $\overrightarrow{AB}$ の終点に $\overrightarrow{BC}$ の始点をおき、 $\overrightarrow{AB}$ の始点 A を始点とし、 $\overrightarrow{BC}$ の終点 C を終点とする変位 $\overrightarrow{AC}$ 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、 $\overrightarrow{AC}$ を $\overrightarrow{AB}$ と $\overrightarrow{BC}$ との合成

変位、 $\overrightarrow{AB}$ と $\overrightarrow{BC}$ とを $\overrightarrow{AC}$ 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 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, または $\vec{A}$, $\vec{B}$, $\vec{PQ}$ 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 $|A|$, $|B|$ または A , B , $\overline{PQ}$ 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 A , B の大きさ, 方向, 向きがすべて互いに等しいとき, A , B は互いに等しいという**. 式で書けば

$$A = B. \quad (3.1)$$

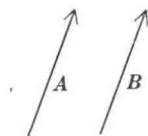


図 1-4

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

定義 ゼロ・ベクトル 大きさが0であるベクトル A をゼロ・ベクトルといい, $A=0$ 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 A , B を三角形の方法で合成してベクトル C が得られたとき, C を A , B の和または合ベクトルといい

$$C = A + B \quad (3.2)$$

と表わす. 逆に, A , B を 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 B に A を加えても, 同じ合ベクトル C が得られる.

すなわち,

$$C = A + B = B + A \quad (3.3)$$

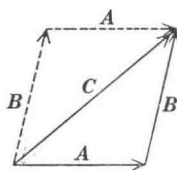


図 1-5 ベクトルの和

となり, 交換の法則が成り立つ****.

* 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, A と 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 C は A , 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 A , B を合成するのに, 1つの点を始点として A , 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

$$(A+B)+C=A+(B+C). \quad (3.4)$$

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

$$R=A+B+C \quad (3.5)$$

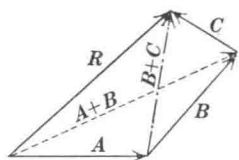
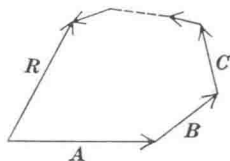


図1-6 ベクトルの結合

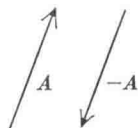
で表わす。同様に、多くのベクトル $A, B, C, \dots$ を合成するには、 A の終点を始点として B を、 B の終点を始点として C を、と以下同様にして、つぎつぎにベクトルを書き、最初のベクトル A の始点を始点とし、最後のベクトル



の終点を終点とするベクトル R を描けばよい。図1-7 多くのベクトルの結合 (図1-7). これを $A, B, C, \dots$ の合ベクトルといい、

$$R=A+B+C+\dots \quad (3.6)$$

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 A と大きさ、方向が互いに等しく、向きが逆なベクトルを A の負ベクトルといい、 $-A$ と表わす。

図1-8 負ベクトル

規則3 ベクトルの減法 A から B を引くことは、 A に $-B$ (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、

$$C=A-B=A+(-B). \quad (3.7)$$

そして、 C を A, B の差ベクトルという。

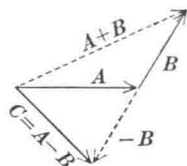


図1-9 ベクトルの差

規則4 ベクトルとスカラーとの積 ベクトル A の大きさ A の $|n|$ 倍の大きさを持ち、 A と同じ方向で、 n の正負によって A と同じ向き、または反対の向きをもつベクトルを nA 、または An とかき、これをベクトル 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。

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

$$n(\mathbf{A} + \mathbf{B}) = n\mathbf{A} + n\mathbf{B}, \quad (m+n)\mathbf{A} = m\mathbf{A} + n\mathbf{A}. \quad (3.8)$$

定義 **単位ベクトル** $\mathbf{A}$ 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 $\mathbf{e}_A$ を $\mathbf{A}$ 方向の単位ベクトルと呼べば

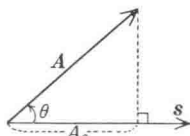
$$\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\mathbf{e}_A = A\mathbf{e}_A, \quad \mathbf{e}_A = \mathbf{A}/A. \quad (3.9)$$

スカラー部分 A は $\mathbf{A}$ の大きさを、ベクトル部分 $\mathbf{e}_A$ は $\mathbf{A}$ 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 $\mathbf{A}$ と $\mathbf{B}$ 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** $\mathbf{A}$ を、これと角 θ をなす方向 $\mathbf{s}$ のうえに正射影した線分を、 $\mathbf{A}$ の $\mathbf{s}$ 方向における成分といい、 A_s で表わす。すなわち

$$A_s = A \cos \theta. \quad (3.10)$$



成分 A_s はスカラーであって、 θ が鋭角ならば 図 1-10 ベクトルの成分
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 $\mathbf{A}$ の座標成分は

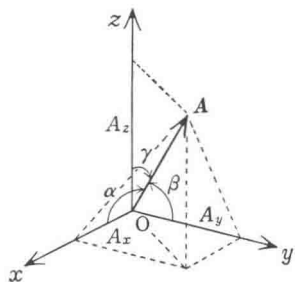
$$A_x = A \cos \alpha, \quad A_y = A \cos \beta, \quad A_z = A \cos \gamma \quad (3.11)$$

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

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}, \quad (3.12)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{A_x}{A}, \quad \beta = \cos^{-1} \frac{A_y}{A}, \quad \gamma = \cos^{-1} \frac{A_z}{A}$$

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。



例えば、図 1-12 によって明らかなように、 図 1-11 ベクトルの x, y, z 成分

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

$$C_s = A_s + B_s. \quad (3 \cdot 13)$$

従って、 x, y, z 方向に対しても

$$\begin{aligned} C_x &= A_x + B_x, & C_y &= A_y + B_y, \\ C_z &= A_z + B_z. \end{aligned} \quad (3 \cdot 14)$$

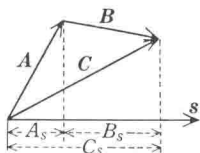


図 1-12 合ベクトルの成分

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

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k} \quad (3 \cdot 15)$$

と表わされる。

従って、 $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ のとき、 $\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}$, $\mathbf{B} = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}$, $\mathbf{C} = C_x \mathbf{i} + C_y \mathbf{j} + C_z \mathbf{k}$ を代入し、

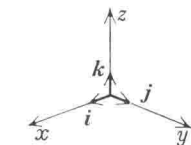


図 1-13 基本ベクトル

両辺の $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 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 $\mathbf{A}$ 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。

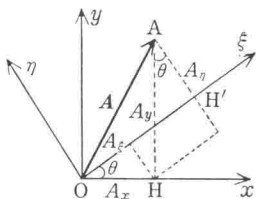


図 1-14 ベクトルの座標変換

解 原点 O を始点としたベクトル $\mathbf{A}$ 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、

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

で、図から明らかに

$$A_\xi = A_x \cos \theta + A_y \sin \theta, \quad A_\eta = -A_x \sin \theta + A_y \cos \theta. \quad (3 \cdot 16)$$

また、これを逆に解いて

$$\begin{aligned} A_x &= A_\xi \cos \theta - A_\eta \sin \theta, \\ A_y &= A_\xi \sin \theta + A_\eta \cos \theta. \end{aligned} \quad (3 \cdot 17)$$

例題 2 同じ点 O を始点とする 2 つのベクトル $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ 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 $\overrightarrow{OG}$ を $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ で表わせ。

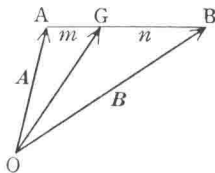


図 1-15