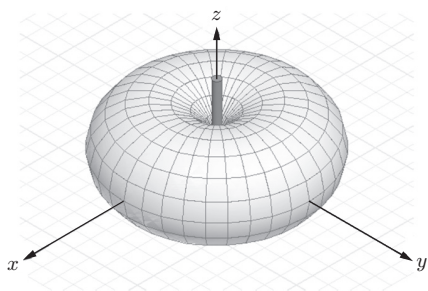


物性・光学のための 電磁気学

——基礎から量子化まで——

工学博士 浜口 智尋 著



コロナ社

ま え が き

本書「物性・光学のための電磁気学——基礎から量子化まで——」は、大学の理工学部や工業高等専門学校の教科書としてまとめたものである。前半は、電磁気学の基礎を理解できるように、実験結果をもとに種々の法則を導出し、マクスウェルの方程式にまとめあげている。後半は、大学院の講義として利用することを念頭に、^{ふく}輻射、導波路、アンテナの理論を詳述し、最後に、マクスウェルの方程式を量子化して、電磁波が光子（フォトン）となることを証明している。各章には理解を助けるための例題や章末問題を多数掲げ、その詳解からより深い理解が得られるように工夫した。

電磁気学は、電気系学生に必須の科目であり、内容は理学部の物理系で学ぶ内容とそれほど差異はない。内容を理解するにはベクトル解析を理解することが必須である。大学での講義などでは、最初にベクトル解析を学ぶが、見慣れない記号が用いられるため、講義の初期段階でその扱いに戸惑い、結果として電磁気学はむつかしい学問であるという感想を抱いてしまう学生が多い。また、電磁気学の総括であるマクスウェルの方程式なるものは、非常に理解困難な内容であると思ってしまう学生も多い。この傾向はここ数十年変わっていない。ところが電気、材料、応用物理系の学生、特に電子物性や光学を学ぶ学生は、電磁気学の公式の理解が必須である。また、電磁波の輻射と伝搬、導波回路、アンテナなどを理解するには電磁気学の修得が必要不可欠である。最近の通信技術の進歩はきわめて速く、無線技術が有線通信（ケーブル通信を含む）にとって代わりつつある。また、市販の電子レンジはマイクロ波を用いたものであり、マイクロ波レーダは気象観測や空の安全のみならず、自動車の安全運転に欠かせない技術となりつつある。つまり、電磁気学は古くてなお新しい学問なのである。大学の講義は、いま変革期に遭遇しつつある。時間の制約のため

に十分に教えられないと不満を漏らす教官も多い。電磁気学の理解を深める最も優れた手段は、最適の例題や問題を解いてみることである。そのため、本書では多くの重要な問題と、その詳細な解法を示している。

本書は、つぎのような方針で編集している。電磁気学の完成、つまりマクスウェルの方程式の導出までを、その完成に寄与して科学者の業績を時系列に沿って理解することを念頭においた。代表的な科学者の伝記の要約と写真を挿入した。まず、クーロンの法則の発見から、ガウスの定理による解釈を述べる。電磁気学の完成には、直流電源の発明が欠かせない。ボルタはガルバーニのカエルの脚から電気が発生するという報告に疑問を抱き、種々の実験後、1800年にボルタの電池を発明する。この装置がヨーロッパに知れわたり、種々の実験がなされた。電流が磁界を誘起することをデンマークのエルステッドが1820年に発見した。この興味ある成果は、瞬く間にヨーロッパ中の科学者の興味を引きつけた。フランスのビオとサバルは、電流素による磁界の式を導き、アンペールは電流の流れている2本の導線間に働く力を計算し、その成果は電流の単位のアンペア [A] の決定に至る。一方、磁界から電流を取り出すことは、1831年にイギリスのファラデーによってなされた。これで基本となる電磁気学の現象はそろった。その後、多数の理論家が種々の定式化を行い、ついに1865年にイギリスのマクスウェルが、いわゆるマクスウェルの方程式にまとめあげた。このマクスウェルの方程式から、電磁波が存在するという予言がなされ、1887年にドイツのヘルツが電磁波の確認に成功した。1900年、輻射に関する実験の解析から、ドイツのプランクが輻射スペクトルの説明に成功し、その結果から輻射波（電磁波）は粒子（フォトン）として働くとの予言を発表した。その後、ディラックによるマクスウェルの方程式の量子化がなされ、1930年頃にはその定式化が完成した。

上記の成果を、まとめあげたのが本書である。その内容は大学における学部学生や高等専門学校の学生が理解できるように配慮した。本書の1章から8章までの内容をまとめるとつぎのようになる。

1章は、ベクトル解析をまとめたもので、電磁気学の理解に必要でかつ十分な

内容とした。例題を解きながら進めば、ベクトルの概念は十分に理解できるものと思われる。特筆すべきことは、電磁気学で ∇ , div, rot なる演算子の取扱いである。これはあくまでも、記号を定義したものであって、数学的な証明は一切不要である。間違っても理解困難な数式であるなどと思わないでほしい。

2章は、電荷の間に働く力は、電荷の積に比例し、電荷の間の距離の2乗に反比例するという、実験結果を表すクーロンの法則の内容とした。電界を定義する。この式からガウスの定理や発散の定理を導く。

3章は、電流が誘起する磁界を定式化する内容とした。ビオ・サバルの法則とアンペールの法則を導く。電磁気学でよく使われるストークスの定理について証明が示されている。この式はマクスウェルの方程式をベクトル・ポテンシャルを用いて解析するのに欠かせない定理である。

4章は、ファラデーの電磁誘導の定式化の内容とした。磁界中に置かれた導線が磁力線を切るとき電流、電圧を誘起する実験結果の定式化がファラデーなどによりなされた。また、磁界中で電荷に働くローレンツの力について詳述している。電流の単位アンペア [A] の決定に用いられたアンペール・バランスの実験装置の原理を説明する。ローレンツ力の式は物性のホール効果や磁気抵抗、高エネルギー加速器の原理などの理解にも必要である。問題を解くことによってより深い理解が得られるであろう。マクスウェルは直流電流が流れない誘電体でも、時間変化したり交流の電界の下では変位電流が流れるという現象を取り入れた。これによりマクスウェルの方程式が完成する。ベクトル・ポテンシャルの定義を述べているが、これは電磁波の輻射や伝搬を解析するのに不可欠である。また、後半のマクスウェルの方程式を量子化して、フォトンとプランクの輻射理論を理解するには必要不可欠である。この章の後半は、後述のように大学院の講義内容あるいは、量子論に興味のある学生のために役立つはずである。

5章は、電気エネルギーと磁気エネルギーの定式化の内容とした。静電容量とソレノイドのインダクタンスを解説し、問題ではこれらを含む回路の解析方法を挙げ、種々の回路での電気エネルギーの時間変化を理解する。

6章は、マクスウェルの方程式を解いて、電磁波が横波であることを示す内容とした。電磁波の伝搬に伴う電磁エネルギー密度の伝達に関するポインティングの定理を導く。光は電磁波の一種であるので、マクスウェルの方程式を解くことにより、光学的な性質、反射、屈折や回折現象に関するスネルの法則、フレネルの法則とヘルムホルツの方程式を理解する。また、導波管を伝搬するTEモード波やTMモード波について論じている。

7章は、アンテナの理論を述べ、ヘルツのダイポールアンテナや半波長アンテナの解析法を概説している。無線通信に必須の内容である。

8章は、マクスウェルの方程式を量子化して、電磁波が粒子のようにエネルギー $h\omega$ の量子からなることを証明し、プランクの輻射理論を導く。ここでは、ばねの運動に相当する単純調和振動子のことを述べ、マクスウェルの波動方程式が調和振動子のハミルトニアンとまったく同じ式で表されることを示す。

付録は、電磁気学の解析に必要なオイラーの公式を述べ、オイラーの式が三角関数と互換性のあることが示している。

本書は以上の内容を含んでいるが、大学の理工学部の学生や工業高等専門学校¹の学生には1章から6章までを学んでほしい。多くの例題と問題を含んでおり、特にこれらの問題は種々の実験を理解するために設けたもので、授業の演習時間に利用すれば、電磁気学のみならず広範囲の領域の理解に役立つものと確信している。そのため、問題には詳細な解答を示している。

6章の後半、7章と8章は大学院レベルであるが、意欲のある学生が高度な内容にチャレンジするためのものと理解していただければ幸いである。これまでに出版された多くの電磁気学のテキストを読んでみたが、マクスウェルの方程式を量子化する手法を詳述したテキストには出会えなかった。筆者は学部²の量子力学の講義で電磁波は粒子性を持つことを教えられ、マクスウェルの方程式の量子化が可能ではないかと思っていた。この疑問を理解するにはやはり、ディラックのような天才のひらめきが必要であることを後年知って、その定式化の美しさに感銘を覚えたものである。学生諸君はこれまでに出版された教科書をもとに勉強されていたり、これから勉強されるものと思われるが、より深

い理解を得るために、本書の内容や例題、問題とその解答例を参考にしていた
だければよいのではと考えている。これにより多くの疑問や難解の内容を理解
できるようになれば筆者の喜びとするところである。

本書を執筆するきっかけを与えてくれた、群馬大学名誉教授の安達定雄氏に
感謝する。長年、学部の電磁気学の講義を担当して来られたが、最近の授業時
間の制約で十分に教えることができない。数学嫌いの学生が増えたことで、電
磁気学のベクトル解析や演算手法にうんざりするものが増えている。学生に教
えるよい教科書がなく、いろいろな教科書を用いてきたが満足できなかったこ
となど現状を伝えていただきました。それなら、これまでの経験から、理論式
をこね回すより、実験事実を理解するための式の導出をもとにしてまとめれば、
学生の理解に役立つのではと考え、本書の執筆を企画したのである。この教科
書の校正の際、たいへん貴重な意見をいただいたので、紙面を借りてお礼を述
べたい。

教科書を最初にまとめ上げて、大阪大学大学院の森伸也教授に相談したとこ
ろ、多くの矛盾、誤解を指摘していただいた。これらの指摘がなければ、本書
の完成には至らなかった。森伸也教授の寄与は筆舌に尽くしがたい。まだまだ、
筆者の誤解や記述ミスなどがあるものと思われるが、読者の皆さんの指摘によっ
てより良い教科書にしたいと願っている。最後に、コロナ社の関係各位には、企
画校正でたいへんお世話になり、お礼申し上げます。

2018年3月

浜口 智尋

E-mail: hamaguchi-chihiro-kk@alumni.osaka-u.ac.jp

目 次

1. ベクトルの公式

| | | |
|---------|-----------------------------|----|
| 1.1 | ベクトルの和, 差と積 | 1 |
| 1.2 | ベクトルのスカラー積 (内積) とベクトル積 (外積) | 6 |
| 1.3 | 単位ベクトル | 8 |
| 1.4 | ベクトル演算子 | 11 |
| 章 末 問 題 | | 15 |

2. 電 界

| | | |
|---------|--------------------------|----|
| 2.1 | 電界, 電気力線, 電束密度, 電気変位, 電位 | 18 |
| 2.2 | ガウスの定理 | 20 |
| 2.3 | 発散の定理 | 23 |
| 章 末 問 題 | | 26 |

3. 磁 界

| | | |
|-----|-------------------|----|
| 3.1 | 磁石が作る磁界と電流が誘起する磁界 | 29 |
| 3.2 | ビオ・サバールの法則 | 32 |
| 3.3 | 磁界に関するガウスの法則 | 36 |
| 3.4 | アンペールの法則 | 39 |
| 3.5 | ストークスの定理 | 42 |

| | |
|---------|----|
| 章 末 問 題 | 44 |
|---------|----|

4. 電 磁 誘 導

| | |
|-------------------------------|----|
| 4.1 ファラデーの電磁誘導の法則 | 46 |
| 4.2 ファラデーの法則の定式化 | 48 |
| 4.3 電 磁 誘 導 | 49 |
| 4.3.1 磁束の時間変化割合 | 49 |
| 4.3.2 定常磁界中のローレンツ力 | 51 |
| 4.3.3 電流が流れている導体に外部磁界が作用する電磁力 | 53 |
| 4.3.4 閉回路の運動による電磁誘導 | 53 |
| 4.3.5 有限長直線導体の運動による電磁誘導 | 55 |
| 4.4 レンツの法則 | 56 |
| 4.5 アンペールの法則とファラデーの法則 | 57 |
| 4.6 アンペールの実験と電流の単位アンペア | 59 |
| 4.7 電流連続の式と変位電流 | 64 |
| 4.8 ベクトル・ポテンシャル | 69 |
| 4.9 陰 極 線 | 72 |
| 章 末 問 題 | 79 |

5. 電 気 エ ネ ル ギ ー と 磁 気 エ ネ ル ギ ー

| | |
|-----------------------|----|
| 5.1 静電容量と電気エネルギー密度 | 82 |
| 5.1.1 電界と電気ポテンシャル | 82 |
| 5.1.2 静電容量と電気エネルギー密度 | 83 |
| 5.1.3 電気エネルギー密度 | 85 |
| 5.2 インダクタンスと磁気エネルギー密度 | 87 |

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 5.2.1 | 巻線コイルのソレノイドとトロイドにおける磁界 | 87 |
| 5.2.2 | ソレノイドとトロイドのインダクタンス | 89 |
| 5.2.3 | 磁気エネルギー密度 | 91 |
| 5.3 | 電気エネルギー密度と磁気エネルギー密度の和 | 94 |
| 5.4 | オームの法則とジュールの法則 | 95 |
| | 章 末 問 題 | 97 |

6. 電 磁 波

| | | |
|-------|------------------------------------|-----|
| 6.1 | マクスウェルの方程式 | 101 |
| 6.2 | 自由空間における平面波解析 | 103 |
| 6.3 | SI 単 位 系 | 104 |
| 6.4 | 電界と磁界の偏波方向 | 105 |
| 6.5 | ポインティングの定理とポインティング・ベクトル | 108 |
| 6.6 | スネルの法則とフレネルの法則 | 110 |
| 6.6.1 | 境 界 条 件 | 110 |
| 6.6.2 | スネルの法則 | 113 |
| 6.6.3 | フレネルの法則 | 114 |
| 6.6.4 | 複素誘電率と電磁波の吸収 | 117 |
| 6.7 | 導波管を伝搬する電磁波とヘルムホルツの方程式 | 119 |
| 6.8 | 導波管を伝搬する電磁波のモード | 121 |
| 6.8.1 | TE モ ー ド | 122 |
| 6.8.2 | TM モ ー ド | 127 |
| 6.8.3 | TE ₁₀ 波のエネルギー密度とエネルギー伝送 | 128 |
| 6.8.4 | マイクロ波発生装置 | 131 |
| | 章 末 問 題 | 134 |

7. 輻射とアンテナ

| | | |
|-----|------------------------|-----|
| 7.1 | スカラ・ポテンシャルとベクトル・ポテンシャル | 135 |
| 7.2 | ローレンツ・ゲージとゲージ変換不変の法則 | 137 |
| 7.3 | ソースを含む波動関数と遅延ポテンシャル | 139 |
| 7.4 | ヘルツのダイポールとアンテナ | 141 |
| 7.5 | 半波長ダイポールアンテナ | 147 |
| | 章末問題 | 151 |

8. 輻射場の量子論

| | | |
|-------|------------------------|-----|
| 8.1 | 量子力学の背景 | 152 |
| 8.2 | 調和振動子の量子化とボゾン・オペレータ | 156 |
| 8.2.1 | 単純調和振動子の波動方程式と解 | 156 |
| 8.2.2 | ボゾン・オペレータを用いた調和振動子の量子化 | 157 |
| 8.3 | 電磁波の正準方程式 | 166 |
| 8.4 | 電磁界の量子化 | 173 |
| 8.5 | プランクの法則 | 177 |
| | 章末問題 | 183 |

付 録

| | | |
|-------|----------------|-----|
| A.1 | テイラー展開 | 184 |
| A.2 | オイラーの公式 | 185 |
| A.3 | 双曲線関数 | 186 |
| A.4 | フェルミ粒子とボーズ粒子 | 186 |
| A.4.1 | フェルミ粒子とパウリの排他律 | 187 |

| | | |
|---------|--------------------|-----|
| A.4.2 | フェルミオンの生成と消滅のオペレータ | 189 |
| A.4.3 | ボーズ粒子 | 191 |
| A.5 | 物理定数表 | 193 |
| 引用・参考文献 | | 194 |
| 章末問題解答 | | 195 |
| 索 | 引 | 232 |

代表的な科学者の伝記

(五十音順)

| | | | |
|--------|-----|--------|-----|
| アンペール | 41 | ファラデー | 78 |
| エルステッド | 31 | プランク | 155 |
| クーロン | 25 | ヘルツ | 150 |
| サバール | 33 | ボルタ | 30 |
| ディラック | 182 | マクスウェル | 132 |
| ビオ | 33 | | |

1

ベクトルの公式

電磁気学を理解するにはベクトル概念の理解が必要である。初めて電磁気学を学ぶとき、大きな時間を割いてベクトルの公式を勉強せざるをえないため、初心者には負担をかけている。このような状況から、電磁気学の本題に入る前に、難しい学問と思いきみ、多くの学生が少なからず嫌いな学問の一つと考えるに至っている。しかし、ベクトル演算の基礎を理解するには、非常に簡単な規則を理解さえすれば、それを自在に利用することができるようになる。つまり、ベクトルの公式の要点を理解すれば、電磁気学の現象を身近に感じるようになり、マクスウェルの公式や電磁波の伝搬について深い理解を得ることができる。

マクスウェルの方程式を導き、その解法を理解するのに必要十分な知識を得ることを目的に、初心者でも容易に理解でき、かつわかりやすいベクトル演算法を用いて、電磁気現象の定式化を行っている。

1.1 ベクトルの和、差と積

物理量にはスカラー量とベクトル量がある。温度や体重、物体の長さなどのように単位があっても方向性を持たない量をスカラー量 (scalar quantity) と呼ぶ。速度や力はその方向を指定しなければならない。例えば、地図上なら東西南北のどの方向に向かってとか、二次元の (x, y) 平面上ならその座標系を用いて方向と大きさを指定しなければならない。このような量をベクトル量 (vector quantity) と呼ぶ。電磁気学では電界や磁界は大きさだけでなくその方向を指定して論じる必要がある。このような場合には座標系においてベクトル表示を用いて表さなければならない。その結果、ベクトル量の四則演算や勾配などの

2 1. ベクトルの公式

演算が必要となる。このような事情から初心者にとってはベクトル演算は面倒なものを受け取られ、結果としてそれを用いる電磁気学は難しい学問とされている。本章では、このベクトル演算の公式の例題を挙げ平易に説明し、電磁気学における現象をより深く理解する助けとする。

最初に、図 1.1 に示すような二次元 (x, y) 直交座標系において原点 $(0, 0)$ から点 $A(4, 5)$ に向かう線を考える。

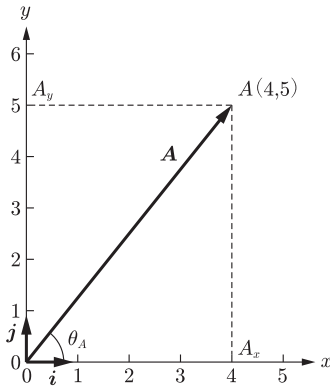


図 1.1 ベクトル \mathbf{A} とその成分。
ベクトルの始点は原点 $(0, 0)$

ベクトル \mathbf{A} は長さ $\sqrt{A_x^2 + A_y^2} = \sqrt{4^2 + 5^2}$ で、その向きは矢印のように原点から点 A 方向である。このベクトル \mathbf{A} はつぎのように表される。

$$\mathbf{A} = A_x \cdot \mathbf{i} + A_y \cdot \mathbf{j} = 4\mathbf{i} + 5\mathbf{j} \quad (1.1)$$

ここに、 A_x 、 A_y はこの座標系での x 成分と y 成分で、 \mathbf{i} と \mathbf{j} はそれぞれ x と y 方向の単位ベクトルと定義され、 $|\mathbf{i}| = |\mathbf{j}| = 1$ である。これらのことから

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}, \quad \theta_A = \tan^{-1} \frac{A_y}{A_x} \quad (1.2)$$

のように表される。ここに θ_A はベクトル \mathbf{A} と x 軸との間の角度である。この角度を用いて、各成分はつぎのように表される。

$$A_x = A \cos \theta_A, \quad A_y = A \sin \theta_A \quad (1.3)$$

例えば、現在地（原点）から目的地 (A_x, A_y) の速度ベクトルを \mathbf{A} とすると、

x 方向 (例えば東方向) の速度が 4 km/h, 北方向の速度が 5 km/h であるとすれば, 速度は $\sqrt{4^2 + 5^2}$ [km/h] であり, その向きを含めてベクトル \mathbf{A} で表される。つまり, 速度はその絶対値の速度と方向を示す必要がある。電界ベクトル \mathbf{E} や磁界ベクトル \mathbf{H} も方向と大きさを持つので, ベクトルで表さなければならない。

二つのベクトルを \mathbf{A} と \mathbf{B} とする。ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{B} の始点は共に同じ点 (時には原点 O) にある。ベクトルの合成には, ベクトル \mathbf{B} を平行移動して図 1.2 に示すように, ベクトル \mathbf{A} の先端にベクトル \mathbf{B} の始点を移すことができる (一致していない場合, 平行移動して配置を換えることが可能である)。この結果ベクトル \mathbf{A} の始点から, 平行移動したベクトル \mathbf{B} の終点までのベクトル \mathbf{C} で表し, ベクトル \mathbf{A} とベクトル \mathbf{B} の和と定義する。この関係を

$$\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B} \quad (1.4)$$

と表す。この法則は力の合成として実験で証明することができる。また, このような法則に従う量はベクトルであると呼ぶ。

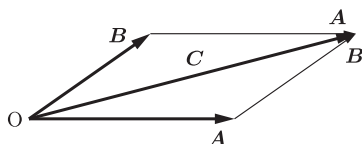


図 1.2 ベクトルの和：
 $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$

図から明らかなように \mathbf{B} の終点にベクトル \mathbf{A} の始点をもってきて, ベクトル \mathbf{C} を与えるので, 和の順序を入れ換えることができる。つまり

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A} \quad (1.5)$$

であり, これを交換の法則と呼ぶ。この法則に関連して

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}) \quad (1.6)$$

が成立する。つまり, ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{B} の和 $(\mathbf{A} + \mathbf{B})$ にベクトル \mathbf{C} を加えたものはベクトル \mathbf{A} とベクトル \mathbf{B} と \mathbf{C} の和 $(\mathbf{B} + \mathbf{C})$ を加えたものに等しい。

4 1. ベクトルの公式

上の関係は「ベクトルは平行移動しても変わらない」という法則を用いたもので、そのことを図 1.3 に示す。この法則はこれらの平行なベクトルによる仕事を考えると、 x 方向の仕事と y 方向の仕事に関して、いずれの \mathbf{A} ベクトルでもまったく同じであることから理解できる。また、例題 1.1 の結果を用いても理解できる。

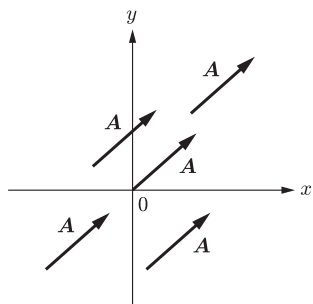
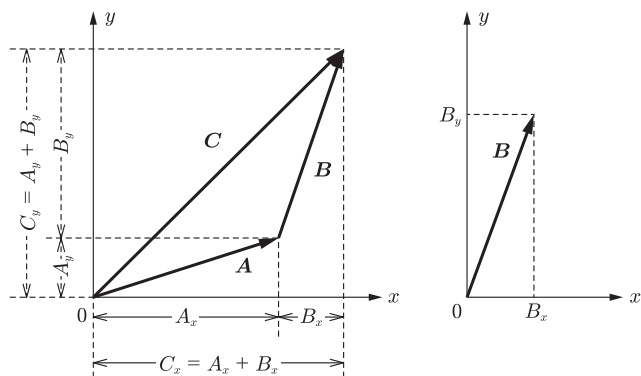


図 1.3 ベクトル \mathbf{A} は平行移動しても不変であり、中のベクトルはすべて \mathbf{A} を表示している。

例題 1.1 式 (1.4) の関係を直角座標系 (x, y) を用いて証明せよ。

【解答】 ベクトル \mathbf{A} , \mathbf{B} , と \mathbf{C} の関係を図 1.4(a) のように書き改めてみる。その x , y 方向成分はつぎようになる。



(a) \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} の x , y 成分

(b) \mathbf{B} の始点を原点に移動

図 1.4 ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{B} の和 $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ の成分分解から式 (1.4) の関係を説明

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j}, \quad \mathbf{B} = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j}, \quad \mathbf{C} = C_x \mathbf{i} + C_y \mathbf{j} \quad (1.7)$$

図 (a) より

$$C_x = A_x + B_x, \quad C_y = A_y + B_y \quad (1.8)$$

であるから

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= (A_x + B_x)\mathbf{i} + (A_y + B_y)\mathbf{j} = (A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j}) + (B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j}) \\ &= \mathbf{A} + \mathbf{B} \equiv C_x \mathbf{i} + C_y \mathbf{j} \end{aligned} \quad (1.9)$$

となり, ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{B} の和 $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ の関係がわかる。また, 図 (a) のベクトル \mathbf{B} は図 (b) のように始点を原点に移動できることもわかる。◇

ベクトルの差は, つぎのように考えることができる。まず, ベクトル \mathbf{B} と大きさが等しくその向きが反対のベクトルを $-\mathbf{B}$ で定義する。ベクトルの差 $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ はベクトル \mathbf{A} とベクトル $-\mathbf{B}$ の和と考えることができ (図 1.5)

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B}) \quad (1.10)$$

である。差のベクトル $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ は図のようにして作られるが, これを平行移動すれば明らかなように, \mathbf{A} と \mathbf{B} の始点が一致するとき $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ はベクトル \mathbf{B} の終点からベクトル \mathbf{A} の終点に向かうベクトルであることがわかる。これは, 式 (1.5), (1.6) よりつぎの関係となることも明らかである。

$$(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + \mathbf{B} = \mathbf{A} + (-\mathbf{B} + \mathbf{B}) = \mathbf{A} \quad (1.11)$$

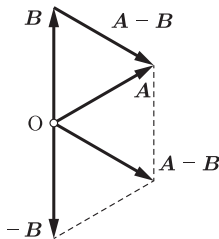


図 1.5 ベクトルの差: $\mathbf{A} - \mathbf{B}$

索引

| | | |
|---|--|--|
| <p>【あ】</p> <p>アノード 72</p> <p>アンテナの輻射パターン 147</p> <p>アンペア・バランス 62</p> <p>アンペール (A. M. Ampere) 41</p> <p>——の平衡電流天秤 59</p> <p>——の法則 40</p> <p>——の法則の一般化 69</p> <p>【い】</p> <p>位相速度 104, 124, 125</p> <p>位置オペレータ 159</p> <p>移動度 95</p> <p>陰 極 73</p> <p>インダクタンスの単位 90</p> <p>インパット・ダイオード (IMPATT) 133</p> <p>【う】</p> <p>ウィルソンの霧箱 76</p> <p>ウェーバ 37, 47</p> <p>運動電磁誘導 52</p> <p>運動誘導起電力 52</p> <p>運動量オペレータ 154, 159</p> <p>【え】</p> <p>s 偏向波 116, 117</p> <p>エネルギーカンタ 152</p> <p>エルステッド (H. C. Ørsted) 31</p> <p>エルミート共役 163</p> <p>エルミート多項式 157</p> | <p>エレクトロンボルト (eV) 84</p> <p>遠視野像 144</p> <p>【お】</p> <p>オームの法則 48, 95</p> <p>——の微視的な説明 95</p> <p>【か】</p> <p>回 転 11</p> <p>外部起電力 48</p> <p>ガウス (J.C.F. Gauss) 21</p> <p>——の定理 21-23</p> <p>角周波数 104</p> <p>カソード 72</p> <p>可動導線 54</p> <p>ガルバノメータ 79</p> <p>ガンダイオード 133</p> <p>ガンマ線 183, 230</p> <p>【き】</p> <p>基底状態 161</p> <p>起電力 46, 47</p> <p>キャパシタ 97</p> <p>キャパシタンス 97</p> <p>キャピティエー 119</p> <p>極座標表示 9</p> <p>近視野像 144</p> <p>【く】</p> <p>空間の 特性インピーダンス 108</p> <p>空 洞 119</p> <p>屈折率 113</p> | <p>クライストロン 131</p> <p>クロネッカーのデルタ記号 158, 169</p> <p>クーロン (C. A. de Coulomb) 26</p> <p>——の単位 62</p> <p>——の法則 18</p> <p>クーロンゲージ 70, 167</p> <p>群速度 124, 125</p> <p>【け】</p> <p>ゲージ不変 136, 138</p> <p>【こ】</p> <p>交換関係 157</p> <p>交換子 158</p> <p>交換の法則 3</p> <p>光 子 152, 153</p> <p>光 速 104</p> <p>恒等オペレータ 187</p> <p>光量子 153</p> <p>黒体輻射スペクトル 154</p> <p>コンデンサ 84</p> <p>【さ】</p> <p>サイクロトロン加速器 80</p> <p>サーチコイル 80</p> <p>サバル (Savart) 33</p> <p>【し】</p> <p>磁 界 41</p> <p>——のエネルギー 171</p> <p>——の単位 42</p> <p>磁界中の仕事 55</p> |
|---|--|--|

磁界に関する波動方程式 104
 磁気エネルギー密度 94
 自己インダクタンス 91
 自己誘導回路 92
 自己誘導係数 92
 磁束 37, 47
 —の時間変化 50
 —の単位 47
 磁束密度 32, 34, 41
 磁束密度に関する
 ガウスの法則 38
 実効値 131
 磁場 29
 遮断周波数 125
 周期的境界条件 167
 ジュール 131
 —の単位 131
 —の法則 55, 96
 ジュール熱 93, 109
 —の単位 96
 シュレディンガーの
 波動方程式 155
 消滅オペレータ 153, 159

【す】

数オペレータ 160
 スカラ・ポテンシャル 20
 —を含む波動方程式 139
 スカラ量 1, 6, 11
 スキンデプス 118
 ストークスの式 76
 ストークスの定理 57
 ストークスの法則 76
 スネルの法則 114
 スレーター行列式 189
 多電子系の— 189

【せ】

正準化方程式 169
 生成オペレータ 153, 159
 静電容量 84
 ゼロ点エネルギー 157, 162, 180

線積分 44
 全反射 117

【そ】

相互インダクタンス 90
 相互誘導係数 90
 ソレノイド 87

【た】

単位ベクトル 2

【ち】

調和振動子
 —のエネルギー 157
 —の基底状態 157
 —の固有関数 156
 —の固有値 156
 —のゼロ点
 エネルギー 157
 直交座標系 2
 —の単位ベクトル 9
 直交座標表示 8, 9

【つ】

対消滅 230
 対生成 230

【て】

抵抗率 95
 テイラー級数 184
 ディラック
 (P.A.M. Dirac) 182
 —のデルタ関数 141
 ディラック定数 153
 テイラー展開 184
 テスラ 33, 37
 電位 20
 —の勾配 25
 電界に関する波動方程式 103
 電界のエネルギー 170
 電荷発散の定理 68
 電荷保存の法則 66
 電荷量の単位 62

電気エネルギー 94
 電気エネルギー密度 83, 87
 電気双極子モーメント 27
 電気素量 63
 電気変位 19
 電気ポテンシャル 82
 電気ポテンシャル・
 エネルギー 82
 電気力線 18, 19
 電磁エネルギー 169, 171
 —の時間平均 172
 電磁エネルギー密度 109, 110, 167

電磁界
 —のエネルギー密度 94
 —の消滅オペレータ 173
 —の生成オペレータ 173
 —の励起状態 173

電磁波 58
 —のインピーダンス 115
 —のエネルギー密度 110
 —の空洞内での電界 178
 —の減衰 118
 —の速度 104
 —の縦方向成分 121
 —の TE モード分散 125
 —のハミルトニアン 173
 —のモード密度 179
 —の横方向磁界成分 121
 —の横方向電界成分 121
 —の量子化 166

電磁ポテンシャル 136, 140
 電磁誘導の法則 49
 電磁力 53
 電束密度 19
 電場 18
 電流素 33
 電流の単位 62
 電流連続の式 66, 68
 電力 96

【と】

透磁率 32, 58

| | | | | | |
|---------------------|----------|------------------|----------|---------------------|----------|
| 真空の—— | 32 | ——の法則 | 47 | ヘルムホルツの式 | 121 |
| 導電率 | 95 | ファラデー・ | | 変位電流 | 67 |
| 導波管 TE モード | 124 | ノイマンの法則 | 47, 55 | 変数分離型 | 122 |
| 導波管 TM モード | 122 | フェルミオン | 186 | ヘンリー | 90 |
| 特性インピーダンス | 108 | フォトン | 152 | | |
| ドリフト運動 | 59, 95 | フォトン・エネルギー | 180 | 【ほ】 | |
| ドリフト速度 | 59 | 輻射モード | 179 | ポアソンの式 | 24, 25 |
| トロイド | 88 | 複素共役 | 168 | ポインティングの定理 | |
| | | プランク (M. Planck) | 155 | | 109, 110 |
| 【な】 | | ——の輻射理論 | 152 | ポインティング・ベクトル | |
| ナブラ記号 | 11 | プランク定数 | 153 | | 109, 176 |
| | | フーリエ級数展開 | 167 | TE モードの—— | 126 |
| 【に】 | | ブリュースター角 | 116 | ——の期待値 | 177 |
| 入射角 | 113 | フレネルの式 | 116 | ボゾン | 186 |
| | | フレネルの法則 | 116 | ボゾン・オペレータ | 159 |
| 【の】 | | 分配則 | 8 | ポテンシャル | 20 |
| ノイマン (F.E. Neumann) | 47 | 分配の法則 | 6 | ポテンシャル・ | |
| ——の法則 | 47 | | | エネルギー | 20 |
| | | 【へ】 | | ボルタ (A. Volta) | 30 |
| 【は】 | | ベクトル | | | |
| ハイゼンベルグの方程式 | 165 | ——の外積 | 7, 10 | 【ま】 | |
| 波数ベクトル | 104 | ——の回転 | 11, 12 | マクスウェル | |
| 波長 | 104 | ——の交換の法則 | 3 | (J.C. Maxwell) | 132 |
| 自由空間の—— | 113 | ——の公式 | 12 | ——の電磁方程式 | 25 |
| 媒質中の—— | 113 | ——の差 | 5 | ——の方程式 | |
| 発散 | 11, 12 | ——の内積 | 10 | 58, 59, 67, 69, 102 | |
| ——の定理 | 24, 26 | ——のナブラ記号 | 11 | ——の方程式の | |
| 波動方程式 | 103, 104 | ——の発散 | 11, 12 | 積分形式 | 102 |
| ハミルトニアン | 155 | ——の反交換 | 8 | ——の方程式の | |
| 電磁波の—— | 173 | ——の平行移動 | 4 | 微分形式 | 102 |
| 反交換 | 8 | ——の方向記号 | 33 | マグネトロン | 131 |
| 反交換関係 | 191 | ——の和 | 3 | マクローリン級数 | 184 |
| | | ベクトル積 | 7 | マクローリン展開 | 184 |
| 【ひ】 | | ベクトル・ポテンシャル | 71 | | |
| p 偏向波 | 116, 117 | ——を含む波動方程式 | 139 | 【み】 | |
| ビオ (Biot) | 33 | ——を用いた正準化 | | 右手系 | 7 |
| ビオ・サバールの法則 | 32 | 方程式 | 169 | 右ねじの法則 | 33 |
| | | ベクトル量 | 1, 11 | | |
| 【ふ】 | | ベクトル和 | 3 | 【め】 | |
| ファラデー (M. Faraday) | 78 | ヘルツ | | 面積素ベクトル | 20 |
| ——の電磁誘導コイル | 46 | (H.R. Hertz) | 136, 150 | 面積分 | 44 |
| ——の電磁誘導の式 | 58 | ヘルツ・ダイポール | | | |
| ——の電磁誘導の法則 | 49 | | 141, 145 | | |

| | |
|-----------------------|--------|
| 【も】 | |
| モード正準表式化した 電磁エネルギー | 172 |
| 【や】 | |
| 矢印記号 | 33, 34 |
| 【ゆ】 | |
| 誘電率 | 18 |
| 誘導起電力 | 47, 54 |
| 【よ】 | |
| 陽 極 | 73 |

| | |
|------------------|---------------|
| 陽電子 | 183, 230 |
| 【ら】 | |
| ラブラシアン ラプラスの式 | 25, 143 25 |
| 【り】 | |
| 量 子 | 152 |
| 【る】 | |
| ループ積分 | 36 |
| ループ電流 | 35 |

| | |
|-------------------------|--------|
| 【れ】 | |
| レンツ (H.F.E. Lenz) | 57 |
| 【ろ】 | |
| ローレンツ (H.A. Lorentz) | 52 |
| ローレンツ・ゲージ | 139 |
| ローレンツ力 | 52, 75 |
| 【わ】 | |
| ワット (W) | 131 |
| ——の単位 | 131 |

—— 著者略歴 ——

1961年 大阪大学工学部電気工学科卒業
1966年 大阪大学大学院博士課程修了（電気工学専攻），工学博士
1967年 大阪大学助教授
1967年 米国バーデュー大学物理学科客員研究員
1985年 大阪大学教授
2001年 大阪大学名誉教授

米国物理学会（APS），英国物理学会（IOP），米国電気電子学会（IEEE），応用物理学会，各フェロー

物性・光学のための電磁気学

—— 基礎から量子化まで ——

Electromagnetism for Solid State Physics and Optics

—— From Basics to Quantization ——

© Chihiro Hamaguchi 2018

2018年7月6日 初版第1刷発行



検印省略

著者 しま ぐち ち ひろ
濱 口 智 尋
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00911-8 C3054 Printed in Japan

(大井)



< 出版者著作権管理機構 委託出版物 >

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-3513-6969，FAX 03-3513-6979，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。