

2021 年作成

# 船舶電気装備技術講座

(初級)

## 電気工学の基礎編

## 目次

1 電気の基本概念 .....	1
1.1 原子と電子 .....	1
1.1.1 原子の構成 .....	1
1.1.2 束縛電子、自由電子、イオン .....	1
1.2 電子から見た導体、不導体、半導体 .....	2
1.2.1 導 体 .....	2
1.2.2 不 導 体 .....	2
1.2.3 半 導 体 .....	2
1.3 摩擦電気・電気力線・電界 .....	3
1.3.1 静電誘導 .....	5
1.3.2 静電しゃへい .....	5
1.3.3 静電容量 .....	5
1.3.4 静電気と動電気 .....	6
1.4 電位差、起電力、電圧 .....	7
1.5 電 流 .....	8
1.6 電気抵抗 .....	8
1.7 オームの法則と電気回路 .....	9
1.7.1 オームの法則 .....	9
1.7.2 電気回路 .....	10
1.8 電気の発生 .....	10
1.8.1 電気発生分類 .....	10
1.8.2 圧電現象 .....	11
1.8.3 熱電現象 .....	11
1.9 直流、交流、瞬時電流、周波数 .....	12
1.9.1 直 流 .....	12
1.9.2 交 流 .....	12
1.9.3 瞬時電流 .....	13
1.9.4 周波数・波長 .....	14
1.10 復習問題 (1) .....	16
2 磁気と電気 .....	17
2.1 磁 石 .....	17
2.2 磁界・磁力線・磁力 .....	17
2.3 磁性体 .....	18
2.4 磁界の強さと方向 .....	19
2.5 磁力線・磁束・磁束密度 .....	20
2.6 電流の磁気作用と電磁石 .....	21
2.6.1 アンペアの右ねじの法則 .....	21
2.6.2 直線状電流による磁界 .....	21

2.6.3	円形電流による磁界 .....	22
2.6.4	起磁力.....	22
2.6.5	電磁力、電流力、フレミングの左手の法則.....	22
2.7	電磁誘導・誘導起電力 .....	23
2.7.1	電磁誘導 .....	23
2.7.2	誘導起電力の方向（レンツの法則） .....	24
2.7.3	誘導起電力の大きさ（ファラデーの法則） .....	24
2.7.4	フレミングの右手の法則 .....	25
2.8	うず電流・うず電流損 .....	26
2.9	磁化曲線、ヒステリシスループ、ヒステリシス損 .....	26
2.9.1	磁化曲線 .....	26
2.9.2	ヒステリシスループ、ヒステリシス損.....	27
2.10	自己誘導・自己インダクタンス .....	27
2.10.1	自己誘導 .....	27
2.10.2	自己インダクタンス .....	27
2.10.3	磁束鎖交数.....	28
2.11	相互誘導、相互インダクタンス .....	28
2.11.1	相互誘導 .....	28
2.11.2	相互インダクタンス .....	29
2.12	電磁結合.....	29
2.13	磁気ひずみ現象.....	30
2.14	磁気しゃへい.....	30
2.15	復習問題（2） .....	31
3	電流の化学作用と電池.....	32
3.1	電気分解.....	32
3.2	金属腐食.....	32
3.3	防食 .....	34
3.4	電池 .....	34
3.4.1	乾電池.....	34
3.4.2	二次電池（蓄電池） .....	35
3.4.3	電池の接続法.....	38
3.5	復習問題（3） .....	40
4	直 流.....	41
4.1	直流の種類 .....	41
4.1.1	電池電源の直流 .....	41
4.1.2	直流発電機の直流 .....	41
4.1.3	整流回路による直流 .....	42
4.2	電圧、電流、抵抗、オームの法則 .....	43
4.3	電 力 .....	44

4.3.1	水の仕事と電気の仕事.....	44
4.3.2	電 力.....	45
4.4	ジュール熱、ジュールの法則.....	45
4.5	電力量.....	46
4.6	入力、出力、効率.....	46
4.7	復習問題 (4).....	47
5	交 流.....	48
5.1	単相交流の発生.....	48
5.2	単相交流の基礎.....	49
5.2.1	電気角と周波数.....	49
5.2.2	位 相.....	51
5.2.3	交流の大きさの表し方.....	52
5.2.4	ひずみ波交流.....	55
5.3	正弦波交流のベクトル及び複素数表示.....	55
5.3.1	正弦波交流のベクトル表示.....	55
5.3.2	ベクトル和と合成電流.....	56
5.3.3	正弦波交流の複素数表示.....	57
5.3.4	複素数の計算.....	58
5.4	単相交流回路の計算.....	60
5.4.1	交流回路のオームの法則.....	60
5.4.2	基礎回路.....	60
5.4.3	直列回路.....	63
5.4.4	並列回路.....	69
5.4.5	インピーダンス計算式のまとめ.....	72
5.5	単相交流の電力と力率.....	73
5.5.1	抵抗回路の電力.....	73
5.5.2	インピーダンス回路の電力.....	74
5.5.3	力 率.....	74
5.5.4	回路定数と力率との関係.....	75
5.5.5	各種負荷の力率の値.....	75
5.5.6	有効電力 P、皮相電力 S、無効電力 Q.....	76
5.5.7	電圧、電流の有効分と無効分.....	78
5.6	復習問題 (5).....	79
6	電気材料.....	80
6.1	概要.....	80
6.2	導電材料.....	80
6.2.1	気体.....	80
6.2.2	液体.....	80
6.2.3	固体.....	80

6.3	半導体材料 .....	83
6.3.1	半導体の性質 .....	83
6.3.2	使用目的による分類 .....	84
6.4	絶縁材 .....	85
6.4.1	絶縁材料の分類と電気絶縁の耐熱クラス .....	85
6.4.2	絶縁材料の特性 .....	86
6.5	磁気材料 .....	89
6.5.1	概要 .....	89
6.5.2	磁心材料 .....	89
6.5.3	永久磁石材料 .....	90
6.5.4	その他の磁気材料 .....	90
6.6	特殊電気材料 .....	91
6.6.1	光電子放出材料 .....	91
6.6.2	熱電子放出材料 .....	91
6.6.3	熱電対材料 .....	91
6.6.4	圧電材料 .....	91
6.7	復習問題 (6) .....	92
7	付録 1 電気用数学の手ほどき .....	93
7.1	三角関数 .....	93
7.1.1	直角三角形の辺と角との関係 .....	93
7.1.2	直角三角形における三つの角の関係 .....	93
7.1.3	直角三角形の解き方 .....	94
7.1.4	角 $\theta$ が $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ の三角関数の値 .....	94
7.1.5	特別な角の三角関数 .....	95
7.1.6	$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$ の変形 .....	95
7.1.7	二角の和と差の三角関数 .....	96
7.1.8	二つの三角関数の積を和と差の形にする .....	96
7.1.9	二つの三角関数の和及び差を積の形にする .....	97
7.1.10	倍数の三角関数 .....	97
7.1.11	弧 度 .....	97
7.1.12	角速度 .....	98
7.2	ベクトル .....	99
7.2.1	ベクトルの表示 .....	99
7.2.2	ベクトルの正と負 .....	99
7.2.3	ベクトルの和 .....	99
7.2.4	ベクトルの差 .....	100
7.3	ベクトルの複素数表示 .....	100
7.3.1	複素数 .....	100
7.4	復習問題 (7) .....	102

8 附録 2 主な量記号・単位記号 .....	103
9 附録 3 国際単位系 (SI) .....	106
9.1 表 1 SI の構成 .....	107
9.2 表 2 基本単位 .....	108
9.3 表 3 接頭語 .....	108
9.4 表 4 電機・電子機器業界で比較的良好に使われている単位 .....	109
9.5 表 5 統一単位 .....	110
9.6 表 6 国際単位系(SI)へ切り替えられた主な単位 .....	110
9.7 表 7 国際単位系(SI)と法定計量単位から削除対象となった計量単位の関係 .....	111
9.8 表 8-1 その他の計量単位と SI 単位の換算関係 (仕事率、工率) .....	112
9.9 表 8-2 その他の計量単位と SI 単位の換算関係 (仕事、エネルギー) .....	112
9.10 表 8-3 その他の計量単位と SI 単位の換算関係 (圧力) .....	112
9.11 表 8-4 その他の計量単位と SI 単位の換算関係 (応力) .....	112
9.12 表 9 術語及び単位の比較 .....	113
10 復習問題解答 (数字は章、節、項等を示す) .....	114
1.10 復習問題 (1) .....	114
2.15 復習問題 (2) .....	114
3.5 復習問題 (3) .....	114
4.7 復習問題 (4) .....	114
5.6 復習問題 (5) .....	114
6.7 復習問題 (6) .....	114
7.4 復習問題 (7) .....	114

# 1 電気の基本概念

## 1.1 原子と電子

### 1.1.1 原子の構成

すべての物質は単一またはいくつかの元素の組合せからできている。それらは原子と呼ばれる粒子でできている。そして、いくつかの原子が結びついてできたものを分子とよぶ。例えば、2個の水素原子(元素記号 H)と1個の酸素原子(O)とで水の分子(H<sub>2</sub>O)が作られるようなものである。分子の中に含まれる原子の数の多少によっていろいろ呼ばれているが、通常高分子といわれる分子は、何万という多くの原子からできているものをいう。

次に原子の構造を水素(H)、ヘリウム(He)及びリチウム(Li)の原子を例にして述べる。

原子番号を  $Z$ 、電子の電荷を  $-e$  [C(クーロン)]

とすると、図 1.1 に示すように、一般に原子の中心には正電荷  $+Z \times e$  [C] をもった1個の原子核と、その周囲を一定の軌道を描きながら回転している負電荷  $-e$  [C] をもった  $Z$  個の電子(electron)からできている。

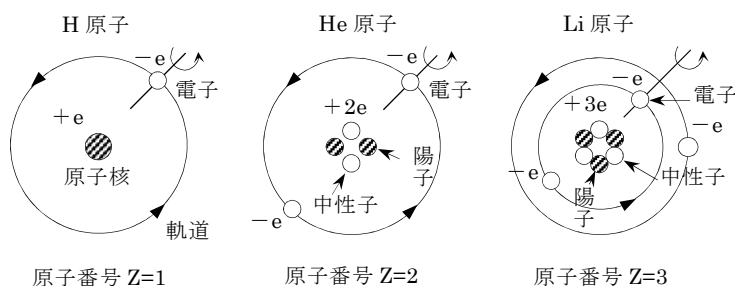


図 1.1 原子の構造例

そして原子核の正電荷  $+e$  と電子の負電荷  $-e$  とは異種であるが等量であるから、原子は全体として中性である。

原子核にある  $Z$  個の正電荷をもった陽子と電荷をまったくもたないいくつかの中性子は核力によって堅く結ばれていて、原子核から陽子を取り出すことは極めて困難である。この力の場に 1935 年湯川秀樹博士が中間子という粒子が存在することを理論的に説明したことはよく知られている事柄である。これらの電子、陽子、中性子のほか中間子等の粒子を総称して素粒子と呼んでいる。

### 1.1.2 束縛電子、自由電子、イオン

- (1) 束縛電子 束縛電子は、原子核の周囲を電子が軌道上を回転している状態の電子、すなわち束縛された電子をいっている。
- (2) 自由電子 自由電子は上記とは少し趣を異にし、外側の電子の運動エネルギーは大きい原子核からの結びつきは比較的弱い。したがって、金属元素等で外部からエネルギーを受けると軌道からはなれて飛び出す電子ができる。これを自由電子という。
- (3) イオン 原子において何かの理由で負電子を失えばその分だけ正電荷が多くなり、それは正に帯電することになるので、この原子を陽イオンと呼び、また、逆に中性状態にある原子に、余分に負の自由電子が飛び込めば、その分だけ負の電荷が多くなり負に帯電した原子となる。これが陰イオンである。これらのイオンが液体及び気体中に存在する条件が整えば、この中を電流が流れる要因となる。

## 1.2 電子から見た導体、不導体、半導体

### 1.2.1 導体

図 1.2 において、電池の⊕端子から豆電球をとって⊖端子に銅線を接続すれば電流が矢印の方向に流れる。

これは正電氣と負電氣を有する電池を銅線で接続したことにより、自由電子( $\ominus e$ )が正電氣に吸引され図 1.2 に示すように、⊖端子から⊕端子に移動したことによる。電流はその逆に⊕端子から⊖端子に流れる。

このように銅やその他の金属のように自由電子を多くもった物体を導体という。

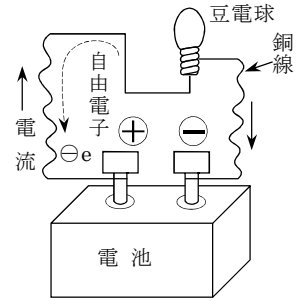


図 1.2

### 1.2.2 不導体

不導体は絶縁体ともいい、殆んど電流が流れないものである。これは完全なる真空の場合のように、電子及びイオンが全く存在しないか、又は電子及びイオンが存在しても本来の位置に閉じこめられて、その運動が制限されているためといわれている。しかし、強い電界が作用すれば、この位置はくずれ、変位を起こす電氣現象が起こり 1.3 で述べるようにクーロンの法則が絶縁体の間で成り立つ。絶縁体をこのようにみる場合、これを誘電体という。

絶縁体には電圧を加えても殆んど前に述べたように電流は流れないが、電圧上昇がある値を越すと、絶縁体を貫通して火花放電が起こる。そして電流が流れ絶縁体としての機能がなくなる。このような現象を絶縁破壊といい、その破壊にまでいたらない、耐える最大電圧を耐電圧という。

### 1.2.3 半導体

半導体は通常の状態では、導体と不導体との中間的な電氣抵抗をもっている。いろいろの物質について電氣抵抗率を示せば図 1.3 のとおりである。

	← 導 体 →		← 半 導 体 →					← 不 導 体 →						
抵抗率 Ωm	10 <sup>-6</sup>		10 <sup>-2</sup>		10 <sup>2</sup>		10 <sup>6</sup>		10 <sup>10</sup>		10 <sup>14</sup>			
物質名	銀、銅	白金、 すず	ニクロム線	グラファイト	黄鉄 鉱	ゲル マニ ウム	けい 素	亜 酸 化 銅 セ レン	ベ ー ク ラ イ ト	雲 母	ダイ ヤ モ ン ド	磁 器	ガ ラ ス	水 晶

図 1.3 いろいろな物質の抵抗率 [Ωm]

シリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、セレン(Se)、テルル(Te)などの元素は半導体である。不純物をまったく含まない半導体を真性半導体といい、例えば、不純物を含まないシリコンやゲルマニウムはこれに属する。これと違って不純物を加えた半導体を不純物半導体という。不純物の種類によって電氣伝導が主として自由電子によって行われる場合を N 型半導体、また、正孔(ホール)による場合を P 型半導体という。

前記のシリコンやゲルマニウムは不純物を加えて用いられる。



真性半導体の電気伝導がなぜ行われるか簡単に説明する。

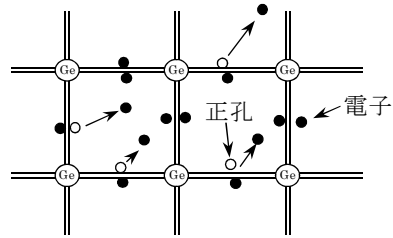
真性半導体のゲルマニウムの結晶では隣りあったいくつかの原子が、それぞれの外側の軌道上の電子を図 1.4 に示すように共有して結合した結晶をつくっている。

この結晶力はやや弱く、常温でもこの電子は結晶を離れ、自由電子として働く性質がある。(図 1.4 に於いて電子の抜けた孔は正孔となり電子と同様結晶内を動きまわる。また、熱エネルギーが与えられると電子が抜けでる。抜け出した電子は自由電子となり結晶の中を動きまわる。)

それゆえに、結合にたずさわっている電子は熱や光などのエネルギーを受ければ、容易に結晶原子の束縛を振り切って飛び出して自由電子となり、また、電子が飛び出したあとに正孔ができる。これらの両者は結晶内を自由に動くことが可能であるから、電界を加えれば結晶内で電気伝導に役立つことになる、これが絶縁体と違った点である。

そして自由電子と正孔とは電気伝導の役目をするので、電荷の運び屋という意味でキャリアという。この状態を図示すれば図 1.5 のようになる。

半導体に外部電源を加えれば正孔は電界の方向即ち外部電源の $\ominus$ に、電子は電界と逆方向即ち外部電源の $\oplus$ に向って移動して電気伝導が行われる。



●電子 (電子が飛び出した孔で)  
○正孔 (正電荷を帯びる。)

図 1.4 真性半導体ゲルマニウムの結晶

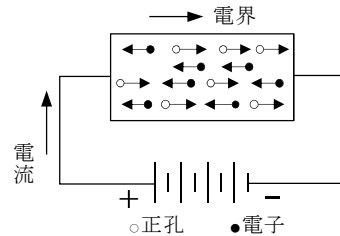


図 1.5 半導体内部の電子と正孔の動き

### 1.3 摩擦電気・電気力線・電界

1660年ドイツのゲーリケが硫黄の球の回転体に乾いた手をあてて電気を発生させ、また、1733年フランスのデュフェイは猫の毛皮で摩擦した封ろうと、絹布で摩擦したガラス棒は両方とも帯電するが、これは異種の電気であると主張した。1747年アメリカのフランクリンがこのガラス電気を正電気(陽電気)、封ろう電気を負電気(陰電気)と名付け、これらの2種は互いに反対の電気であって、二つを合わせれば、中和される現象を説明した。

このような正負2種の電気を説明するためには、磁力線と同様に電気力線を想定したほうが理解し易い。

封ろうの電気を負の電気(-)、ガラス棒の電気を正の電気(+)という。その作用は図 1.6(a)のように電気力線は正電気から負電気に向い、図 1.6 (b)では正電気同士であるから反発しあっている。また、負電気同士も同様に反発する。

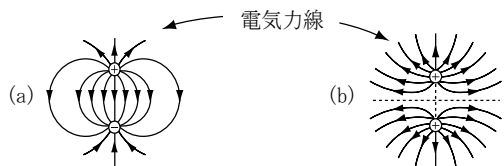


図 1.6 電気力線

このように電気力線の存在している空間を電界と称し、その線の密度の多少によって電

界の強さを表す。なお、電気力線の矢印の方向は電界の方向を表す。

物体が摩擦等によって電気を帯びることを帯電といい、帯電した物体は帯電体という。

また、帯電体のもつ電気量を電荷といている。したがって、電気力線は、正電荷から負電荷に向かう。

電荷の大きさを表す単位にクーロン（単位記号〔C〕）を用いる。

二つの電荷の間に働く力（静電力、またはクーロン力ともいう。）には次の性質がある。

「二つの電荷間に働く力  $F$  の大きさは両電荷  $Q_1$ 、 $Q_2$  の積に比例し、電荷間の距離  $r$  の 2 乗に反比例し、その方向は両電荷を結ぶ直線上にある」

これを電荷に関するクーロンの法則という。

上記のクーロンの法則を式で表せば

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

ここで、

- $Q_1$ 、 $Q_2$  : 電荷      [C]
- $\epsilon$  : 誘電率      [F/m]
- $\pi$  : 円周率      3.14
- $r$  : 距離      [m]

備考 1.  $Q_1$ 、 $Q_2$  の単位 [C]（クーロン）は、電荷の量の単位で、これは真空中で、1 [m] の距離におかれた電荷の等しい二つの電荷間に働く力が

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \quad [\text{N}] \quad \text{であるとき、各電荷の量を 1 [C] としたものである。}$$

\* : (本「電気工学の基礎編」では、数学記号 “ $\approx$ ” (JIS 規格、約又はほぼ等しい) を国際規格 (ISO) の “ $\sim$ ” に準拠して記載する。)

2. 誘電率  $\epsilon$  [単位記号 F/m] は電気力をとおす媒質すなわち誘電体によって定まる値である。真空の誘電率を  $\epsilon_0$  とすれば、

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.842 \times 10^{-12} \quad [\text{F/m}] \quad \text{である。}$$

真空の誘電率  $\epsilon_0$  を基準として、一般の誘電体の誘電率  $\epsilon$  を  $\epsilon_0$  との比で表した

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{をその誘電体の比誘電率という。}$$

真空中では、 $\epsilon_s = 1$ 、空気中では  $\epsilon_s \approx 1$  として計算できる。比誘電率  $\epsilon_s$  の例をあげれば次のようである。

ベークライト 4.5～ 5.5、エポナイト 2.8、ファイバ 2.5～5、ガラス 5.4～ 9.9、陶器 5.7～ 6.8、ゴム 2.0～ 3.5。

### 1.3.1 静電誘導

図 1.7 において帯電している A 導体に帯電していない B 導体を近づければ、図のように B 導体には A 導体の近い側に異種の (A が + であれば -)、遠い側には同種 (A が + であれば +) の電荷があらわれる。この現象を静電誘導という。次に A 導体を除けば、B 導体はもとの帯電しない状態にもどる。このことから静電誘導によって現れた正、負の電荷の量は等しいことがわかる。

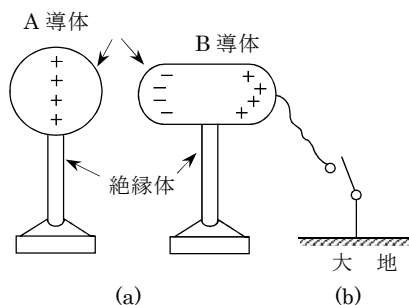


図 1.7 静電誘導

静電誘導によって B 導体の両端に電荷が現れている図 1.7(a)の状態のとき、B 導体の右端を図 1.7(b)のように大地に結べば B 導体の負電荷は A 導体の正電荷と引き合っているため動かないが、B 導体の正電荷は A 導体の正電荷との間に働く反発力のため大地に逃げ去る。

このとき、大地との結びを解き A 導体を遠ざければ、B 導体には負電荷が残ることになる。

### 1.3.2 静電しゃへい

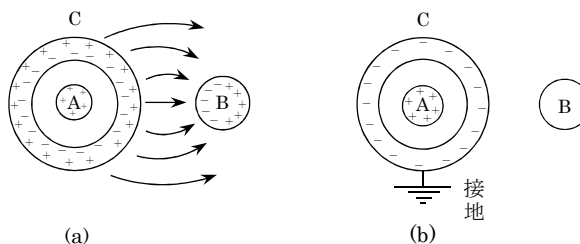


図 1.8 静電しゃへい

図 1.8(a)のように、帯電している A の付近に導体 B をおけば、B は静電誘導によって帯電する。これを防ぐためには図 1.8(a)のように中空導体 C で包む。A が正電荷をもっているとすれば静電誘導によって C の内側表面には負電荷が現れ、外側表面には正電荷が現われる。ここで導体 B を C に近づけると B の表面には図のような電荷分布が現れる。

そこで図 1.8(b)のように導体 C を接地すれば、外側表面の正電荷は大地に逃げる。C は大地と同電位になり、B は A の影響をうけなくなる。このように A・B 間の静電誘導を接地により遮断することを静電しゃへいという。静電しゃへいは電子機器の回路間の静電誘導を防ぐために利用される。

### 1.3.3 静電容量

図 1.9 のように、A 導体と B 導体を誘電体をはさんで対向させ、乾電池によって電位を与えれば、A 導体には  $+Q$  の電荷、B 導体には  $-Q$  の電荷が蓄えられる。

この場合直流であるから電流は流れない。そして、与えた電位  $V$  [V] と、生じた電荷  $Q$  [C] とは比例し次の関係式で表される。

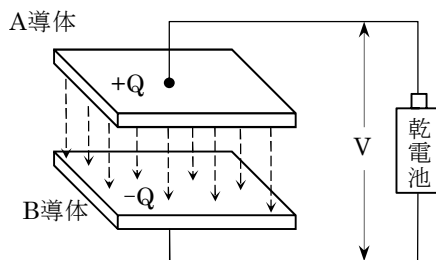


図 1.9 静電容量