第2章

オームの法則と基本的な回路網の計算

❖

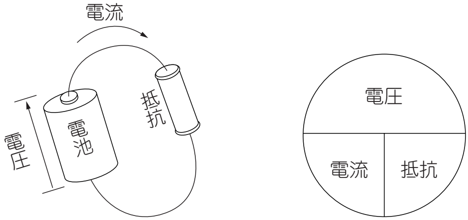
学校で覚えたオームの法則と，基本的な計算を最初に説明します．
オームの法則は，簡単だと思ってないがしろにしてはいけません．
以降に示す交流回路なども含めて，回路解析の基本/中核となるものです．
電子回路に触れる初心者の方は最初の一歩として，
ある程度知識のある方にとっては再確認の意味も含めて，
ここで基本計算を見ていきましょう．

❖

2-1　基本がわかればあとはその延長．怖いものはない

● 回路網解析のすべての源「オームの法則」

オーム（Georg Simon Ohm，1789-1854）は実験をもとにし，**図2-1**のような電圧と電流と抵抗の関係を定義しました．電圧と電流と抵抗の大きさのうち，二つが決まれば，残りの一つの大きさをこの関係で求めることができます．また図中のように，円を書いて上と下にそれぞれの関係を入れることで，オームの法則を覚える方法の一つとして表すこともできます．



［図2-1］オームが定義した電圧と電流と抵抗の関係

これは学校で習う，電気回路の計算の基本中の基本といえるものでしょう．しかしオームの法則は，本書でこれから続けて説明していく，回路網[※1]の計算や交流回路/高周波回路の解析などの考え方すべての源になるものです．馬鹿にしたりなめてかかってはいけません．

▶ オームの法則を使って電力を計算する

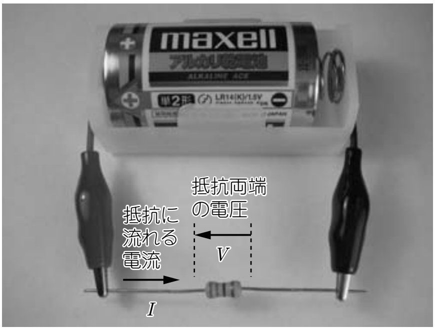
抵抗で熱となる，抵抗で損失する電力は以下のように求めます．**図2-2**の写真の抵抗の両端にかかる電圧と，抵抗に流れる電流の積が電力になります．つまり，

$$\left.\begin{array}{l} \text{電力 [W]} = \text{抵抗両端の電圧 [V]} \times \text{抵抗に流れる電流 [A]} \\ P = V \times I \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}1)$$

となります．式の下の段は電力をP，抵抗の両端の電圧をV，抵抗に流れる電流をIとして英文字で表したものです[※2]．それぞれの単位として電力[W]（ワット），電圧[V]（ボルト），電流[A]（アンペア）も記載しています．

また，さらにここにオームの法則を，

$$\left.\begin{array}{l} \text{抵抗両端の電圧 [V]} = \text{抵抗の大きさ [}\Omega\text{]} \times \text{抵抗に流れる電流 [A]} \\ V = R \times I \end{array}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots (2\text{-}2)$$



［図2-2］抵抗で消費する電力を考える回路

※1：**回路網**という用語は電気回路理論の本などでよく使われている．ここでは「計算対象として回路を見る」という意味でこの用語を用いた．「回路図集のような電子回路ブロックを考えるのとは異なる視点」である．しかし**網**がついていても，対象とするのは**回路**自体には変わりない．

※2：ここでなぜIなのかは，ドイツ語のIntensität（英語のIntensity）から来ている．

として適用させてみると，

$$\left.\begin{aligned}&\text{電力 [W]} = \text{抵抗の大きさ [Ω]} \times (\text{抵抗に流れる電流 [A]})^2\\&P = V \times I = (R \times I) \times I = R \times I^2\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}3)$$

と表すことができます．抵抗の大きさR，抵抗の単位[Ω]（オーム）も記載していま す．またまたさらに，オームの法則を，

$$\left.\begin{aligned}&\text{抵抗に流れる電流 [A]} = \frac{\text{抵抗両端の電圧 [V]}}{\text{抵抗の大きさ [Ω]}}\\&I = \frac{V}{R}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}4)$$

と適用させてみると，

$$\left.\begin{aligned}&\text{電力 [W]} = \frac{(\text{抵抗両端の電圧 [V]})^2}{\text{抵抗の大きさ [Ω]}}\\&P = V \times I = V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2\text{-}5)$$

とも表せます．電圧と電流を掛けたものだけが電力ではなく，抵抗の大きさも含めて便利に計算ができるのです．なお，電力は単位時間あたりの発熱になりますので，発熱量は電力に時間（秒）を掛け合わせたものになります（単位は[J]（ジュール））．

● 電源と抵抗の特性と極性を定義しておく

▶ 電圧源

電圧源は，電池が一つの例だといえますが※3，**図2-3**(a)のように流れ出す電流量にかかわらず，端子の電圧が変化しない，という特性のものです．

▶ 電圧源（起電力）の極性と流れ出す電流方向を定義するのはとても大切

電圧源には電圧のプラス・マイナスの極性が当然ありますが，**電流の極性**はプラス側の端子から回路に向かって**流れ出し**，マイナス側の端子に**流れ込む**として決められます．これにより**図2-3**(b)のように電圧源（この電圧を**起電力**と言う）の極性の方向と電流の方向を**定義**しておきます．以後に説明するキルヒホッフの法則もこ

※3：電池は，電流を多くとりだすと電圧は下がってしまうが，そうならない理想的な電池として，ここでは考える．次の第2章2-2でより詳しく掘り下げる．

の定義を使います．

「アホなことを今更……」と思うかもしれませんが，以降の回路網計算を間違いなく行ううえで，この流れる向きの考え方は非常に重要です．

▶ 電流源

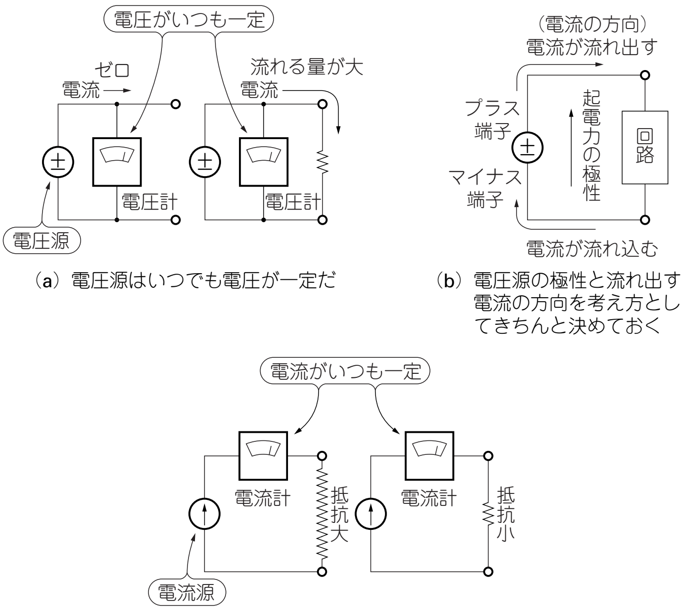
電圧源は回路初心者にもイメージしやすいと思いますが，電流源は意外とイメージしづらいかもしれません．例を挙げると（難しい応用例になるが），カレント・ミラー回路やフォト・ダイオード素子などが電流源に相当します．

電流源は**図2-3**（c）のように，つながる回路の抵抗値の大きさにかかわらず，端子から流れ出る電流が変化しない，という特性のものです．

電流の極性についてここでも話をしておくと，**図2-3**（c）のように電流源は矢印の方向に電流が流れるものとして決められます．

▶ 電流源をより実際的に理解する

イメージをつかむために実際の数値で示してみます．**図2-4**（a）のように，2mA



(a) 電圧源はいつでも電圧が一定だ

(b) 電圧源の極性と流れ出す電流の方向を考え方としてきちんと決めておく

(c) 電流源はいつでも電流が一定だ

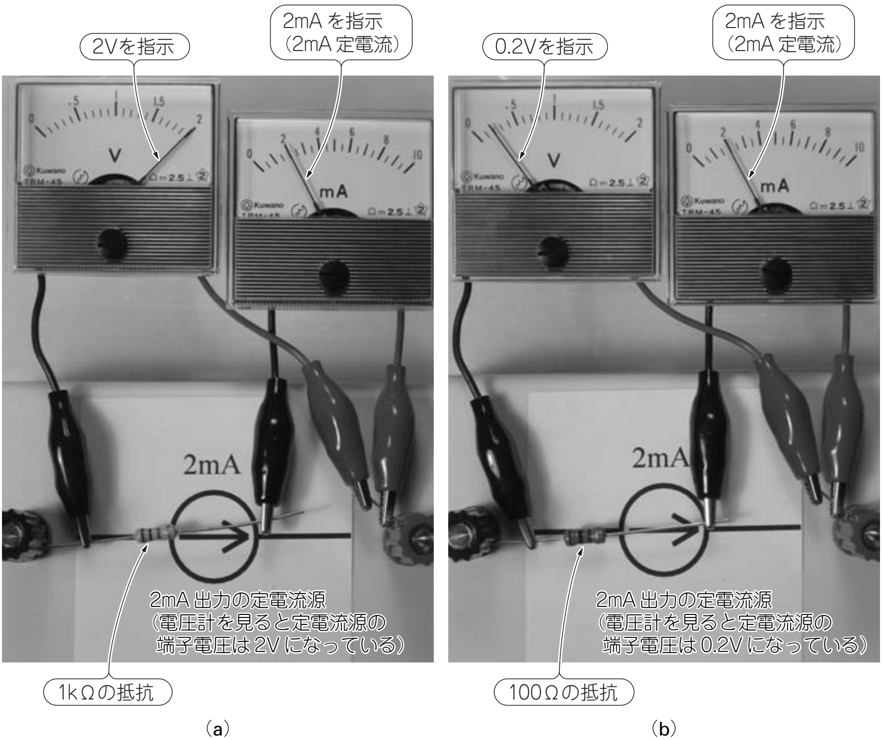
[図2-3] **電圧源と電流源**

出力の電流源に1kΩの抵抗をつないでも2mAが流れ，同図(b)のように100Ωをつないでも2mAである，ということです．

「では，そのときの電流源の両端の電圧は何Vになるか？」の答えは，同図のように「電流が一定になるように電圧が変化します」です．

図中で上記の例を示すように，1kΩのときは2Vになって，100Ωのときには，0.2Vになるのです．これは単純な話，「電圧源は負荷によって**電流**が，電流源は負荷によって**電圧**が変化する」とそれぞれ変化するところが違うだけ，ということです．

電流源は，理論的な面としてはあまり表立って出てきませんが，電子回路や計測，伝送分野では実際の電子回路として意外と広く利用されています．



[図2-4] 電流源をより実際的に理解するため実際の数値で示してみる

▶ 抵抗による電圧降下の電圧極性と電流の方向を定義しておく

さきの「電圧源(起電力)の極性と流れ出す電流方向を定義するのはとても大切」と似たような話をもう一度します．

抵抗に電流が流れた場合，オームの法則 $V = R \times I$のとおり，抵抗の端子間に電圧が発生します．**図2-5**を見てください．抵抗に電流が流れたときに発生する電圧(これを**電圧降下**という．つまり抵抗での電圧ロス分のこと)は，図中のように**電流が流れ込む側**が**電圧が高く**なり，そちらをプラス方向と定義します．

電流の流れる方向を基準とすれば，この電圧降下は起電力の場合と異なり，**起電力のプラス方向の定義と逆方向**になります．この電流と起電力と電圧降下の向きの考えをきちんと理解しておくことは，回路網計算において大変重要です．忘れないでください．

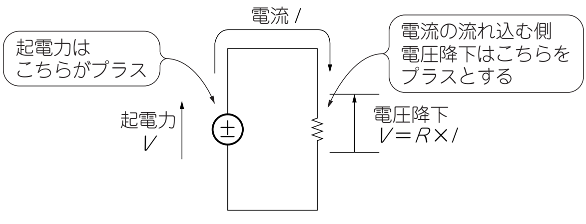
● 基本測定器の電圧計/電流計とオームの法則(測定レンジの拡大)

いまでこそディジタル・マルチ・メータが全盛になっていますが，電圧計の電圧レンジ，電流計の電流レンジ拡大の考え方は，回路網計算の基本中の基本といえるでしょう．

▶ 測定電圧レンジ拡大の計算

図2-6は電圧計とその内部等価回路です．測定値を表示する内部抵抗が無限大のメータ部分(たとえばフル・スケール50Vとする．なお写真の現品は50V品ではない)と，ある大きさの内部抵抗R_0[Ω](メータを振らせるために必要な要素，たとえば$R_0 = 100\mathrm{k}\Omega$とする)をもっています．電圧計が理想的であればこの内部抵抗は無限大になります．この内部抵抗の両端に加わる電圧が，電圧計の示す電圧になります．

では，**図2-7**のように抵抗R_1[Ω](たとえば$R_1 = 1\mathrm{M}\Omega$とする)を加えてみましょう．ここで測定したい電圧$V_{measure}$を500Vだとしておきます．R_0にかかる電圧，つまりメータの振れ量は以下で計算できます．まず，電圧500Vにより抵抗R_0，R_1



［図2-5］抵抗の電圧降下の考え方

に流れる電流 I は**オームの法則**から，

$$I[\mathrm{A}] = \frac{500\mathrm{V}}{100\mathrm{k\Omega} + 1\mathrm{M\Omega}} = \frac{500}{1100 \times 10^3} = \frac{500}{1100} \times 10^{-3}\mathrm{A}$$

になります．ここで大事なことは**電流は水の流れと同じ**であり，**分流する部分がなければ，どの部分でも電流の大きさは同じ**ということです．知っている人は「何を当たり前な事を！」と言うと思いますが，理解しておくべき非常に重要な基本事項です（後半のキルヒホッフの法則にもつながる）．

電流 I により R_0 に発生する電圧，つまり電圧計が示す電圧 V_{meter}[V] を計算してみると，

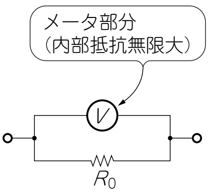
これ以後，理解補助のため，このような手書きを入れていく．

$$V_{meter}[\mathrm{V}] = I[\mathrm{A}] \times R_0[\Omega] = \overbrace{\frac{500}{1100} \times 10^{-3}}^{I} \times \overbrace{100 \times 10^3}^{R_0}$$
$$= \frac{500 \times 100}{1100} = 500 \times \frac{100}{1100}\mathrm{V}$$

となります．つまり電圧計が分担する電圧は，測定したい電圧 $V_{measure} = 500\mathrm{V}$ の100/1100倍，45.45Vになります．フル・スケール50Vのメータでも振り切れないのです！これを V_{meter}，$V_{measure}$，R_0，R_1 を用いて表してみると，

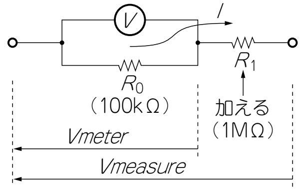
$$\overset{(\text{メータ})}{V_{meter}} = \overset{(\text{測定})}{V_{measure}} \frac{R_0}{R_0 + R_1} \quad \cdots\cdots (2\text{-}6)$$

という関係で V_{meter} が現れるのです．



内部等価回路

［図2-6］電圧計と内部等価回路



［図2-7］抵抗 R_1[Ω] を加えてみる
（測定電圧レンジ拡大のため）

逆に考えてみると，フル・スケールが V_{meter}（最初の仮定では50V）であれば，何Vでフル・スケールになるかというと，上の式の逆数を取ってみれば，

$$V^{\text{(測定)}}_{measure} = V^{\text{(メータ)}}_{meter}\frac{R_0 + R_1}{R_0} \quad \cdots\cdots (2\text{-}7)$$

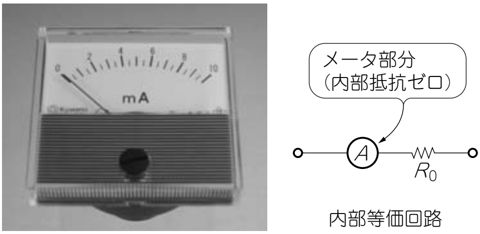
となり，測定電圧（フル・スケール）が $(R_0 + R_1)/R_0$ 倍に（例だと $[50 \times (100 + 1000)/100]$ Vに）拡大されます．これに合わせてメータの目盛りを振りなおせばフル・スケールが拡大された電圧計ができあがります．電圧レンジ拡大を実例として示しましたが，これが回路網計算の基礎の基礎です．

▶ 測定電流レンジ拡大の計算

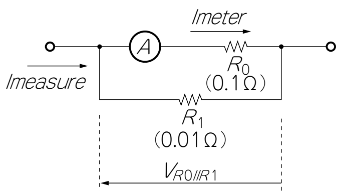
次に電流測定の例を示しましょう．**図2-8**は電流計とその内部等価回路です．測定値を表示する内部抵抗がゼロのメータ部分（たとえばフル・スケール5Aとする．なお写真の現品は5A品ではない）とある大きさの内部抵抗 R_0[Ω]（メータを振らせるために必要な要素，たとえば $R_0 = 0.1\Omega$ とする）をもっています．電流計が理想的であればこの内部抵抗はゼロになります．この内部抵抗に流れる電流が，電流計の示す電流になります．

では**図2-9**のように，抵抗 R_1[Ω]（たとえば $R_1 = 0.01\Omega$ とする）を加えてみましょう．ここで測定したい電流 $I_{measure}$ を50Aだとしておきます．

R_0 に流れる電流，つまりメータの振れ量は以下で計算できます．まず抵抗 R_0，R_1 の合成抵抗 $R_{0//1}$[Ω][※4]は，並列接続であることから，抵抗の逆数同士の足し算となり，



［図2-8］電流計と内部等価回路



［図2-9］抵抗 R_1[Ω]を加えてみる
（測定電流レンジ拡大のため）

※4：$R_{0//1}$ は「R_0 と R_1 が並列につながれた」という意味合い．とくに//は並列接続を表すことも多い．

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{R_{0//1}}[\Omega] &= \frac{1}{R_0}+\frac{1}{R_1}\\ \frac{1}{R_{0//1}}[\Omega] &= \frac{1}{\underset{\nwarrow R_0}{0.1\Omega}}+\frac{1}{\underset{\nwarrow R_1}{0.01\Omega}}\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}8)$$

になります．これを $R_{0//1}=$ として計算しなおすと，

$$\left.\begin{aligned}R_{0//1}[\Omega] &= \frac{R_0\times R_1}{R_0+R_1}\\ R_{0//1}[\Omega] &= \frac{0.1\times 0.01}{0.1+0.01}=\frac{0.001}{0.11}\Omega\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}9)$$

この $R_{0//1}$ に $I_{measure}=50\text{A}$ が流れるので，このときの $R_{0//1}$ 両端の電圧 $V_{R0//R1}[\text{V}]$ は**オームの法則**から，

$$V_{R0//R1}[\text{V}] = I_{measure}\times R_{0//1} = 50\text{A}\times\left(\frac{0.001}{0.11}\right)\Omega$$

です．$R_{0//1}$ 両端の電圧がわかりましたから，R_0 に流れる電流量 I_{meter} だけを計算してみると，これも**オームの法則**から，

$$I_{meter}[\text{A}] = \frac{V_{R0//R1}[\text{V}]}{R_0[\Omega]} = \frac{50\times\overbrace{(0.001/0.11)}}{0.1} = 50\times\frac{\;\frac{0.001}{0.11}\;}{0.1} = 50\times\frac{0.01}{0.11}$$

となります．つまり電流計が分担する電流は，測定したい電流 $I_{measure}=50\text{A}$ の $0.01/0.11$ 倍，4.545A になります．フル・スケール5Aのメータでも振り切れないのです！これを I_{meter}，$I_{measure}$，R_0，R_1 を用いて表してみると，

$$\overset{\text{(メータ)}}{I_{meter}} = \overset{\text{(測定)}}{I_{measure}}\frac{R_1}{R_0+R_1} \cdots\cdots\cdots\cdots (2\text{-}10)$$

という関係で I_{meter} が現れるのです※5．

※5：第7章7-2に示すように，並列に接続された2個の抵抗にそれぞれ分流する電流は，2抵抗値を足し算したもので反対側の抵抗の大きさを割った比率になる．

逆に考えてみると，フル・スケールがI_{meter}（最初の仮定では5A）であれば，何Aでフル・スケールになるかというと，上の式の逆数を取ってみれば，

$$\overset{(\text{測定})}{I_{measure}} = \overset{(\text{メータ})}{I_{meter}} \frac{R_0 + R_1}{R_1} \quad \cdots\cdots (2\text{-}11)$$

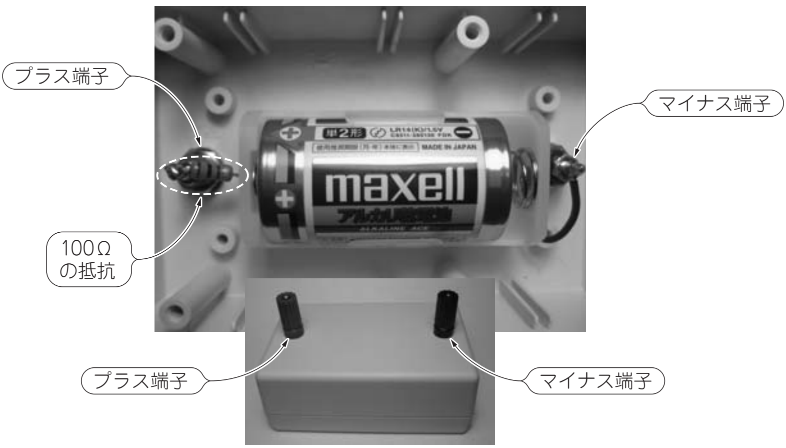
となり，測定電圧（フル・スケール）が$(R_0 + R_1)/R_1$倍に（例だと［$5 \times (0.1 + 0.01)/0.01$］Aに）拡大されます．これに合わせてメータの目盛りを振りなおせばフル・スケールが拡大された電流計ができあがります．

ここで大事なことは**電流は水の流れと同じ**であり，**分流する部分があれば，それぞれ流れやすさに応じて分流する**ということです．ここも理解しておくべき非常に重要な基本事項です（後半のキルヒホッフの法則にもつながる）．

以上のように回路網の計算の基本として，電圧計，電流計を説明してきましたが，本書の以降の考え方のほぼすべては，これを単に拡張していっただけ，応用していっただけなのです．「オームの法則，侮れじ」ですね．

2-2　電池と抵抗の基本回路で基本定理をマスターしよう

だいたいどの回路理論の本も回路図だけで説明していますので，実感がわかないかもしれません．そこでここでは写真を交えて実践的に示していきたいと思います．



［図2-10］電池と直列に抵抗がつながったものがケースに収まっている