第1講

はじめに：「ことば」の整理

これから電子回路のことを学んでいきますが，そもそも電子回路は，電気を扱うものですから，「電気に関すること」は，いわば「電子回路における言葉」のようなものです。多くの皆さんにとっては，当たり前のことがらもあるかもしれませんが，初めに，一通りの「電子回路の言葉」をおさらいしておきましょう。

1.1　電圧と電流

電子回路で扱う信号は，すべて「電気」です。電気を表す量は，「電圧」と「電流」しかありません*。つまり電子回路とは，「どのような電圧を加えたら，どのような電流が流れるか」という「電圧と電流の関係」で理解することができます。

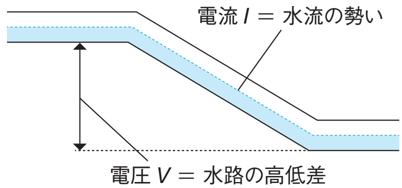


図 1.1　水の流れにおける電圧と電流

では電圧と電流は，どのようなものだったでしょうか。よく例えられるのは，図 1.1 のような水の流れです。電流は流れている水の量，電圧はその水を流す落差，と考えればよいです。当然ですが，水は高いところから低いところへ流れますから，電流が流れる向きは，電圧が高いところから低いところへ，です。そんなの当たり前だよ，と思われるかと思いますが，ぜひ今後，折に触れて，この「水の流れのアナロジー」を思い出して理解してください。ところでニュースなどで「高圧電流」という表現をみることがありますが，よく考えると，これはおかしい表現ですね。電圧の大きさはボルト（V），電流の大きさはアンペア（A）という単位で表します。

ちなみにここでは「電圧を加えると電流が流れる」と書きましたが，逆に

＊　電荷や磁界もありますが，“電荷は電流の積分として必要に応じて”で扱えますし，磁界が電子回路に直接関係するのは EMI（電気的ノイズ）と電磁誘導ですが，いずれもこの本で扱う範囲を超えますので，この本では，“電圧と電流ですべてを考える”，という立場を取ります。

「電流が流れることで電圧が生まれる」と考えることもできます。これは追々見ていきたいと思います。

1.2　オームの法則とキルヒホッフの法則

電子回路では，何かに電圧を加えて，そこに電流を流す，わけですが，その対象のことを「負荷」と呼びます。負荷は，電圧を加えられて電流を流されて，何かの働きを生みます。例えば負荷が LED であれば光を発し，モーターなら力を生みます。

その負荷に加える電圧と流れる電流の関係は，図 1.2 のようなオームの法則として知られています。これは，ある素子に加わる電圧 V と流れる電流 I の比（V/I）を**抵抗 R** と定義する，とみることができます。そして素子によっては，この抵抗の値（単位はオーム〔Ω〕）が一定となり，$V=IR$ という関係が成り立ちます。これが皆さんがよく知っているオームの法則の式ですね。

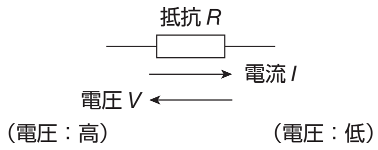


図 1.2　オームの法則

このオームの法則の式は，見方を変えると図 1.3 のように「抵抗 R に電流 I を流すと，その両端に電圧 V が生まれる」と考えることもできます。つまり電流が原因，電圧が結果，ということです。この両者の見方の使い分けは，以後，実例を交えながら紹介していきますが，まずはこのような見方があることを心にとめておいてください。

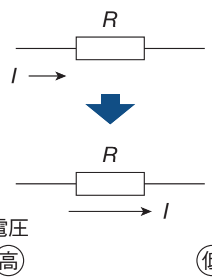


図 1.3　抵抗に電流が流れると，両端に電圧が生まれる

なお多くの素子では，この抵抗の値は一定とはなりません。つまり加える電圧と流れる電流は比例しません。しかし別の方法で，素子の「抵抗に相当する値」が求められたり決まったりする場合があります。そのような場合は，図 1.4 のように，その「抵抗に相当する値」から，その素子に加える電圧から流れる電流を求めたりできます。

このオームの法則を，複数の素子からなる回路に拡張したものが，図1.5のキルヒホッフの法則です。詳細は電気回路の教科書に譲りますが，ここでも，ここまでに紹介したオームの法則の考え方を使って，回路に沿った電圧の変化と，それによって流れる電流をイメージしながら，自分なりの理解をしておいてください。その際，「電流は電圧が高い方から低い方へ流れる」という，電圧の高低と電流の向きの関係は，常に心がけましょう。

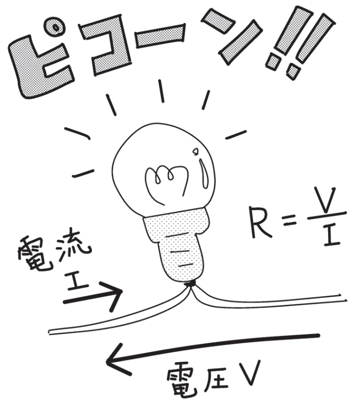


図 1.4 「抵抗に相当する値」が決まれば，電圧と電流の関係はオームの法則を満たす

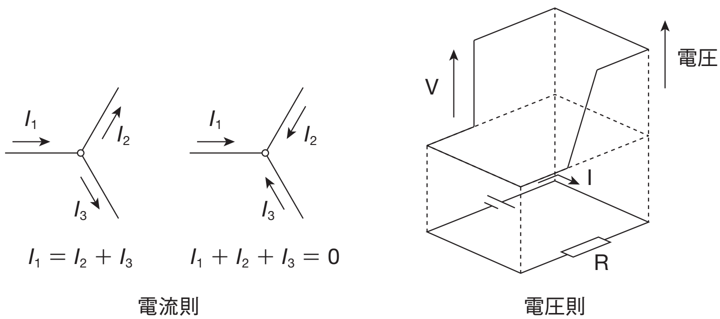


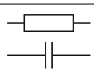
図 1.5 キルヒホッフの法則の理解のしかた

・第1法則：電流は流れ続けるので，分岐において入る量と出る量は等しい。これは出る量を「入る量がマイナス」と考えれば，入る量の総和はゼロ，と言い換えられます。

・第2法則：回路を一周すれば，電圧が上がる分と下がる分は等しい。これは下がる分を「上がる量がマイナス」と考えれば，回路一周での電圧変化はゼロ，と言い換えられます。

演習 1.1

図1.6の左側の回路で，$V_1 = -1\,\mathrm{V}$，$V_2 = 13\,\mathrm{V}$，$R_1 = R_3 = 3\,\Omega$，$R_2 = 2\,\Omega$ と



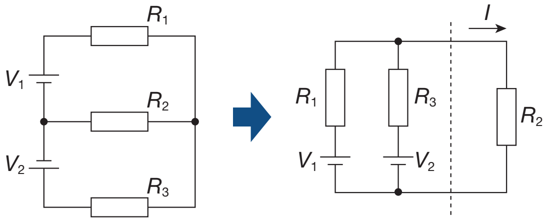


図 1.6　電圧と抵抗からなる回路の例

して，各抵抗に流れる電流を求めましょう。

1.3　等価回路とテブナンの定理

電子回路を構成する素子が多くなってくると，1 個 1 個の挙動を考えていくのは大変です。しかし電子回路は，あくまでも「電圧を加えたら電流が流れる」ものですから，その回路が「どう見えるか」は，図 1.7 のように，その

コラム：抵抗の回路図記号

つい最近まで，抵抗素子の回路図記号にはギザギザの記号が使われていましたが，1999 年前後に国際規格にあわせて JIS 規格が改定され，長方形の記号を使うことになりました。この本では，JIS 規格にしたがって，正式（？）な長方形の記号を使うことにします。ただ JIS 規格には法的拘束力がないのと，あまりに長い間ギザギザ記号が使われていたため，いまだにこちらを目にする機会も多く，こちらの記号の方がなじみのある方も多いかと思います。ちなみに，JIS 規格が変わったのに旧記号を使い続ける人たちを「抵抗勢力」と言うんだとか言わないんだとか…。

電圧と電流の関係でしか理解することができません。言い換えれば，その回路の中身がどうなっているかは，外からは知ることはできず，加える電圧と流れる電流の関係でしかとらえられない，ということです。例えば図1.8のように，中に2本の抵抗 R_1，R_2 が直列につながっている回路と，$(R_1 + R_2)$ という抵抗値の1本の抵抗がつながっている回路は，箱の外から見る限り，区別することはできません。

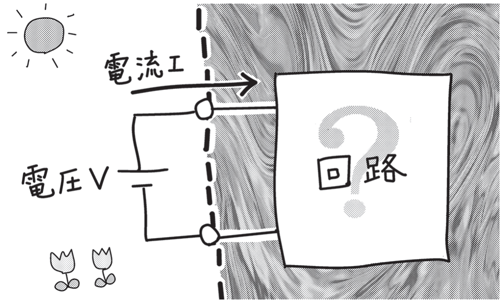


図 1.7　電子回路が，外からどう見えるか

そこで電子回路では，その回路が外から見てどう見えるか，という観点で，「外から見て同じ働きをする回路」を考えると便利です。このような回路を**等価回路**とよびます。先ほどの図1.7の例では，抵抗が2本ある回路の等価回路は，抵抗が1本の回路，と言うことができます。

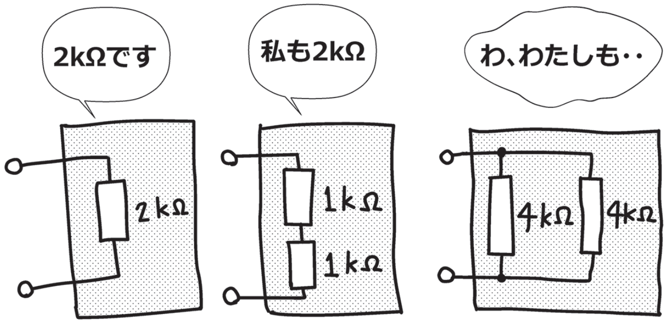


図 1.8　回路の中身が違っても外からは区別できない例

ある回路の等価回路を求める，つまり外から見るとその回路がどう見えるかを求めるためには，加える電圧と流れる電流の関係を調べることになりますが，その回路が線形な素子（抵抗などの電圧と電流の関係が比例する素子）からできている場合は，どのような回路でも，図1.9のような，電圧源と抵抗だけの，とても簡単な等価回路を求めることができます（**テブナンの定理**（鳳(ほう)ーテブナンの定理とも呼ぶ））。この E_0 は開放電圧，つまり何も負荷をつ

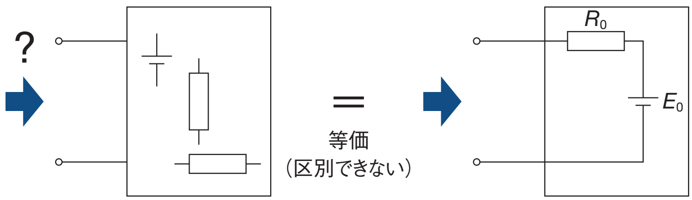


図 1.9　テブナンの定理

ながない状態でこの回路に現れる電圧です。そして R_0 は，この回路の中に実際にある電圧源をゼロ（短絡），電流源をゼロ（開放）して求めた合成抵抗の値，です。どのような回路でも，外から見る限り，この等価回路と同じようにしか見えない，というわけです。そんな大胆な簡略化ができるのか？と心配になりますが，これは図 1.10 のように証明することができます。この定理，電気回路の教科書には載っているものの，なかなか実際に使う場面がないために忘れがち（私もそうでした）なのですが，電子回路，特にトランジスタの小信号等価回路の理解に不可欠ですので，ぜひ覚えて（思い出して）おいてください。

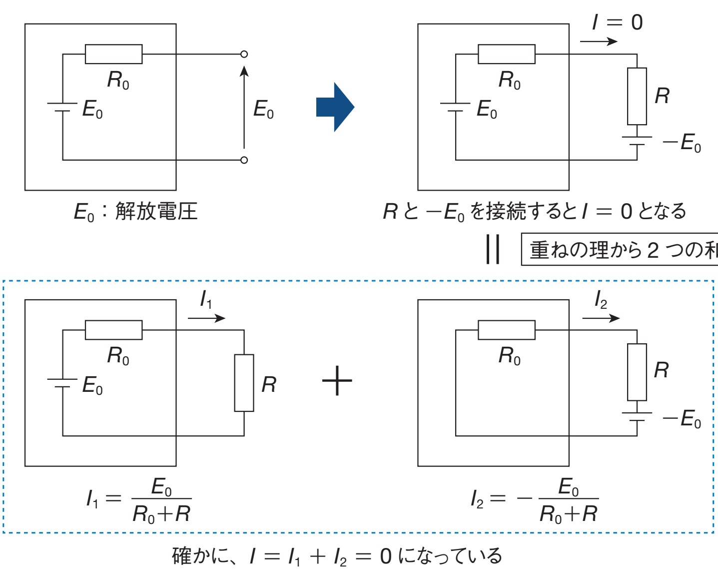


図 1.10　テブナンの定理の証明

演習 1.2

テブナンの定理を使って，図 1.6 の回路の点線の右側からみた左側の等価回路を求めましょう。また $V_1 = -1\,\mathrm{V}$，$V_2 = 13\,\mathrm{V}$，$R_1 = R_3 = 3\,\Omega$，$R_2 = 2\,\Omega$ として，R_2 を流れる電流 I を求めてみましょう。

1.4　直流と交流

電子回路で扱う信号は，電気信号，つまり電圧や電流であるわけですが，電圧や電流が時間とともにどう変わるか，によって扱いが異なります。

1 つは，時間で変化をしない一定の値をとる電圧や電流で，**直流**（Direct current；DC）と呼びます。一定の電圧を「直流」電圧と呼ぶのは，言われてみればへんな表現ですが，この表現を使います。

もう 1 つは，時間とともに変化する電圧や電流で，**交流**（Alternative current；AC）と呼びます。ただ，時間とともに変化する，といっても，どう変化するのかが漠然としすぎているので，電子回路ではほとんど（すべてでも言ってもいいかもしれない）の場合，図 1.11 のように，時間に対して正弦波となる電圧や電流を扱います。正弦波以外の信号はどう扱うのか，と心配になるかもしれませんが，どのような波形でもフーリエ変換すれば正弦波の和として表現できるため，それぞれの正弦波に対する電子回路の挙動の和と考えればよいので，心配はいりません。というわけで，正弦波の電圧・電流を交流電圧・交流電流と呼びます。

正弦波の特徴を決めるパラメータは，図 1.11 のように，**振幅** A，**周波数** f，**位相** θ の 3 つで，これを使って次のように書くことができます。

$$V(t) = A\sin(2\pi ft + \theta)$$

つまり時刻 t における電圧は，この式で求められるわけです。f の前に 2π がつくのは，一周期の時間 $t = 1/f$ で，三角関数の sin が一周期の 2π となるようにするためです。周波数 f（単位は [Hz]）は，周期 T（単位は [s]）と $f = 1/T$ という関係

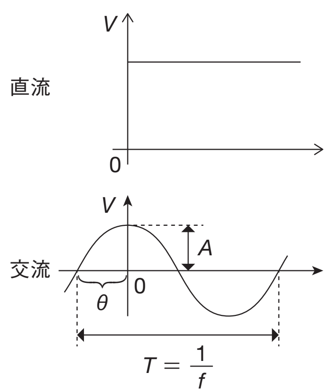


図 1.11　直流と交流（正弦波）のグラフ

があるのでした。また $\omega = 2\pi f$ のことを**角周波数**（単位は [rad/s]）と呼びます。位相 θ は，ちょっと理解しにくいので，図 1.12 の例をみてみましょう。図 1.12（a）は，時刻 $t = 0$ で電圧が 0 となる正弦波で，$\sin(x)$ のグラフと式を考えればわかるように，$\theta = 0$ となります。次に，仮に $\theta > 0$ としましょう。$t = -\theta/2\pi f$ ですから，sin() の括弧の中身がゼロとなるのは，$t < 0$ のときです。つまりこの場合の正弦波のグラフは，図 1.12（b）のように，$\theta = 0$ の場合よりも左にずれます。この状態を「位相が進んでいる」と呼びます。横軸が時刻 t のグラフで，グラフが左に動いて時間が戻っているように見えるのに「位相が進んでいる」というのは，慣れないと違和感を感じるかもしれませんが，「$\theta > 0$ は位相が進んでいる」と理解しておきましょう。逆に $\theta < 0$ の場合はグラフが右に動いて「位相が遅れている」と呼びます。なお $\theta = 180$ 度の場合は，位相が進んでいても（$\theta = 180$ 度），遅れていても（$\theta = -180$ 度），どちらの場合でも，元のグラフと上下が逆になることに注意しておきましょう。これは式の上では $\sin(x + 180°) = -\sin(x)$ にに対応します。

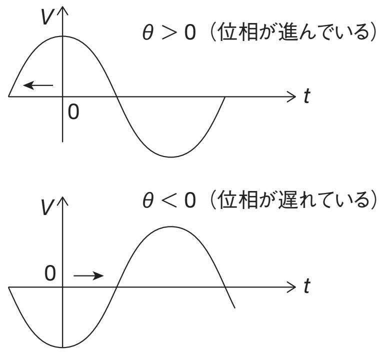


図 1.12　正弦波と位相 θ の関係

演習 1.3

$f = 50$ Hz の正弦波の周期 T と角周波数 ω を求めましょう。また一周期分 (T) の時間変化が位相で何度に対応するかを求めましょう。

ところで実際の電子回路では，図 1.13 のように，直流と交流の両方が混じった場合がよく出てきます。例えば，正弦波だけど t 軸よりも上にあるような場合です。このような場合は，その信号を直流と交流に分けて考えればよいです。つまり交流（正弦波）は必ず t 軸の上下で対称に変化します（変化の中心がゼロということ）ので，変化の中心を探してそれを直流成分 V として，そこを中心に変化する交流成分を v とすればよいのです。ところでさりげなく書きましたが，この V と v のように，電子回路では基本的に，**直流成

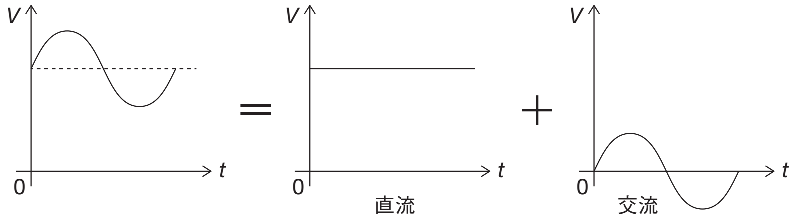


図 1.13　直流と交流が混じった信号

分を大文字，交流成分を小文字で書きますので，よく覚えておいてください。

1.5　インピーダンス

ここまでの話とは直接関係ないのですが，けっこう苦手な人も多いかと思いますので（私がそうでした），交流信号を扱う上で避けられない**インピーダンス**の考え方をおさらいしておきましょう。

インピーダンスとは，簡単に言ってしまうと「抵抗のようなもの」です。素子の両端に加える電圧 v（小文字なので正弦波の交流です），流れる電流を i（これも交流）とすると，その両者の比 $Z = v/i$ を，この素子のインピーダンスと定義するのですが，この v/i は，オームの法則の抵抗そのものです。つまり，抵抗以外の素子でも定義できる「抵抗のようなもの（電圧と電流の比）」がインピーダンスであるわけです。そう言われてしまえば，えらく簡単に思えてくるかと思いますが，実際，交流信号を加える抵抗・コンデンサ・インダクタからなる回路で，それぞれのインピーダンスを「抵抗のようなもの」とみなして，オームの法則やキルヒホッフの法則，分圧の法則などの式は立てられます。あくまでも「抵抗そのもの」ではないのですが，頭の中では「抵抗」と考えるとよいでしょう。

導出過程は省略しますが，コンデンサのインピーダンス $Z_C = 1/j\omega C$，インダクタのインピーダンス $Z_L = j\omega L$ となります。この j（虚数単位）がどうも苦手という方も多いかと思いますが，これも含めて，合成抵抗（インピーダンス）を複素数として計算すれば OK です。

ところでインピーダンスに j が出てくるのは，さきほどの正弦波の位相と関係します。詳しくは電気回路の教科書を参照していただくこととして，要点だけまとめると，$e^{j\omega t}$ は複素平面で時間とともに回転するベクトルですが，

このベクトルの実軸への投影が実際に観測される電圧・電流であると考えます。コンデンサの v と i は，インピーダンスの定義から $i = j\omega Cv$ という関係がありますが，複素平面で j をかけることは，90 度の回転に対応しますので，図 1.15 のように，i のベクトルは v のベクトルを 90 度回転させたものということになります。つまり，i は v より位相が 90 度進んでいる，ということになります。位相の進み・遅れはなかなか慣れないと思いますが，「インピーダンスが複素数」=「v と i の位相がずれている」=「v と i の変化のタイミングがずれている」，ということは，ぜひ理解しておいてください。

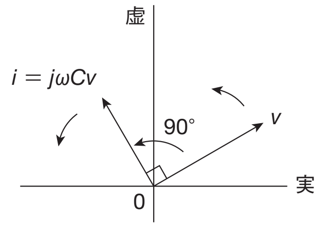


図 1.15　複素平面のベクトルと位相の関係

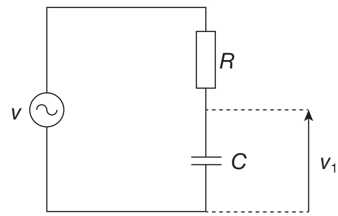


図 1.16　インピーダンスによる分圧

演習 1.4

図 1.16 の回路の v_1 を求めましょう（分圧の法則）。

1.6　入出力からみる「回路の特徴」

電子回路の「外から見た特徴」は，与える入力信号と出てくる出力信号の関係，でしか見ることができません。そこで入力 v_i と出力 v_o の関係として，この両者の比 v_o/v_i を，これを，この電子回路の特徴を表すもの，と考えることにします。（この v_o/v_i は，電子回路の種類によって，**伝達関数**や**増幅率**などと呼ばれます）

一般には，出力信号の特性は，入力信号の周波数に応じて変わりますので，この v_o/v_i は信号の周波数の関数となり，さらに両者に位相のずれが生じる場合が多いので，一般に複素数となります。つまり，この v_o/v_i の絶対値が v_o と v_i の振幅の比，v_o/v_i の偏角が v_o と v_i の位相の差を表すことになります。

1.7　数値の表し方

この講の最後に，電子回路を扱っていく上で，よく使う数値の表し方についてまとめておきます。

電子回路で扱う電圧や電流，周波数，増幅率などの数値は，非常に大きい値や非常に小さい値をとったりします。例えば増幅率 1,000,000 倍，電圧 0.000001 V，周波数 1,000,000,000 Hz，のようなゼロがたくさんつく数値が日常的に現れます。そのたびにこのようにゼロを並べて書くのは，見にくいですし，間違いのもとです。

そこで，単位の前につける「補助単位」がよく使われます。例えば重さ「1 kg」の k（キロ）は，1000 倍を表す**補助単位**で，重さの単位の g（グラム）の前につけて，「kg」で 1000 g のことを表します。この k の他に，電子回路では図 1.17 のような補助単位がよく使われます。

補助単位	p	n	μ	m	k	M	G
読み方	ピコ	ナノ	マイクロ	ミリ	キロ	メガ（メグ）	ギガ
倍率	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{3}	10^{6}	10^{9}

図 1.17　よく使われる補助単位

ちなみに補助単位がつく数値どうしの計算は，補助単位どうしでまとめて行うと便利です。例えば 1 [V] ÷ 1 [mA] は，単位だけの割り算では [V/A] = [Ω] となり，補助単位どうしに着目すると，分子が補助単位なし（1 倍），分母が補助単位 m（ミリ = 10^{-3} 倍）ですので，これらだけを計算すると 10^3 倍となります。10^3 倍を表す補助単位は k（キロ）ですので，単位の計算とあわせると，この結果は 1 [kΩ] ということになります。この補助単位が混じった数値の計算は，ぜひ慣れてください。

演習 1.5

1 kΩ の抵抗に 10 mV の電圧を加えたときに流れる電流を求めましょう。

もう 1 つ，電子回路でよく使われる，大きな値の表し方に，**デシベル**（dB）

表記があります。これは増幅率などの比率（倍率）の値を表記する方法で，倍率 A を次のような式で求めるものです。

$$20 \log_{10} A \quad [\mathrm{dB}]$$

例えば $A = 10$ 倍は 20 dB，$A = 100$ 倍は 40 dB，$A = 1000$ 倍は 60 dB となります。よく考えるとわかるように，倍率どうしのかけ算は，デシベル表記では，例えば以下のように和となります。これは，対数の $\log A + \log B = \log AB$ という関係に対応します。

$$A_1 = 10 \text{ 倍}\ (20\ \mathrm{dB}),\ A_2 = 100 \text{ 倍}\ (40\ \mathrm{dB})$$
$$\rightarrow A_1 \cdot A_2 = 1000 \text{ 倍}\ (60\ \mathrm{dB})$$

ちなみに 2 倍 = 6 dB というのもよく使うので，覚えておくとよいでしょう。また 1/10 倍 = −20 dB となります。

このデシベル表記とあわせてよく使われるのが，グラフの対数軸です。これは軸の目盛りを対数で表記したもので，周波数や増幅率など，大きな値の変化をとるグラフでよく使われます。なお縦横の両者を対数軸としたグラフでは，$y = x^n$ は傾きが n の直線となることに注意しておきましょう。これは $\log y = n \log x$ のためですが，例えば反比例（$y = 1/x$）のグラフは傾き −1 の直線となります。

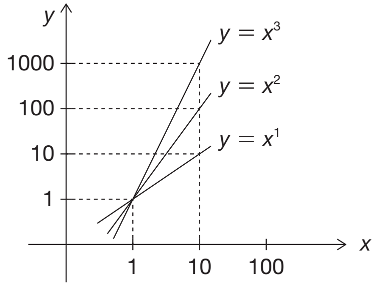


図 1.18　対数軸と，そこに描いた $y = x^n$ のグラフ