第10章

ツール4
対数

$\log_{10}$，$\log_e$の使い分けと変化量の大きい電波を受信する実験

自然対数$\log_e$の使い方と対数の便利さを実体験

第9章では対数を日常的な話でイメージし，「見える化」というキーワードで電子回路設計への応用について説明しました．また，常用対数を使った「レベルの違いを表すdB(デシベル)」について詳しく説明しました．

本章でも，「見える化」をキーワードにして，対数の応用である「dB」を，さらに深く理解していきましょう．そして回路のふるまいを計算するための自然対数の使い方，実際の実験により，対数を本物の回路の動きから理解するという話に進めていきましょう．なぜ対数が電子回路で必要なツールなのかがわかると思います．

10-1 測定結果を対数グラフで表そう（常用対数の使い方）

ここでの説明は，**まったく異なるスケールのものを一度に取り扱える**ことがポイントです．その点を意識して読み進めてください．

●非常に広範囲な数値をグラフ化するときに対数が役に立つ

前章の最初に「見える化」という話をしました．実際の電子回路設計での見える化は，見たいところがよくわかるグラフのことだと言えるでしょう．

電子回路で「見える化」したいのに，普通にグラフをプロット(グラフの線を描く意味)するとわかりにくいものに，以下のような場合が挙げられます，

(1) **図10-1**のように，回路が動作する周波数帯域が非常に広いもの(低いところから高いところの比として…という意味．ハイファイ・オーディオや高周波測定器などが例) ⇨ これはだいたいグラフのX軸方向の大きさとして作図される

(2) **図10-2**のように，信号のレベルが非常に広範囲にわたっているもの(音響システムや無線通信，深宇宙探査衛星通信の場合が例) ⇨ これはだいたいグラフのY軸方向の大きさとして作図される

この2点はそれぞれ電子回路として考えるまでもなく，日常生活で「このようなものは結構広範囲である」ことは直感的にわかるでしょう．

さて**図10-1**のように，普通のグラフで表すと，高い周波数(4186 Hz～8372 Hz)のあたりの変化は図から読み取れますが，低い周波数(32.7～65.4 Hz)での違いを「見える化」できていません．

▶広い周波数範囲で大事な部分を「見える化」するには対数が必要

これを対数で考えてみましょう．前章の**図9-5**のように「対数のものさし」上では，n倍する前と後の大きさ同士の距離は，もとの値が何であっても同じで

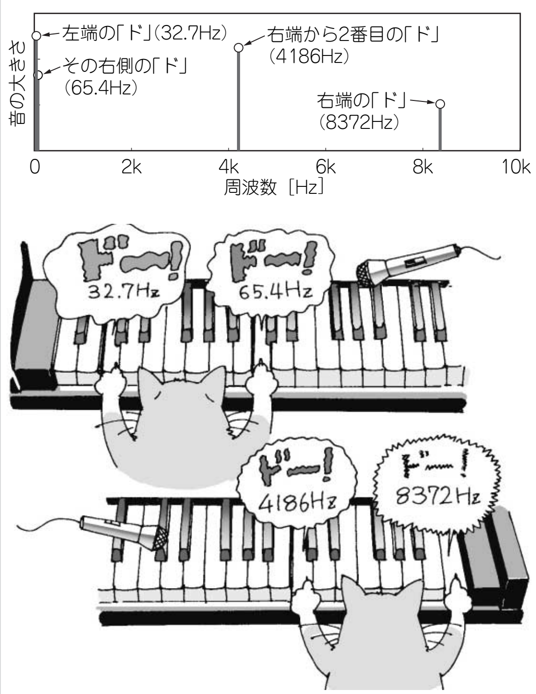

図10-1 普通にグラフをプロットするとわかりにくいもの①
周波数帯域(グラフのX軸)が非常に広いもの．普通の直線グラフで表すと，高い周波数(4186～8372 Hz)のあたりの変化は図から読み取れるが，低い周波数 (32.7～65.4 Hz)の違いを「見える化」できない．

図10-2 普通にグラフをプロットするとわかりにくいもの②
音の大きさの範囲(グラフのY軸)が非常に広いもの．普通の直線グラフで表すと，大きい音(大声のカラオケ～ジェット・エンジン)のあたりの変化は図から読み取れるが，小さい音(虫の声～ささやき声)の違いは「見える化」できない．

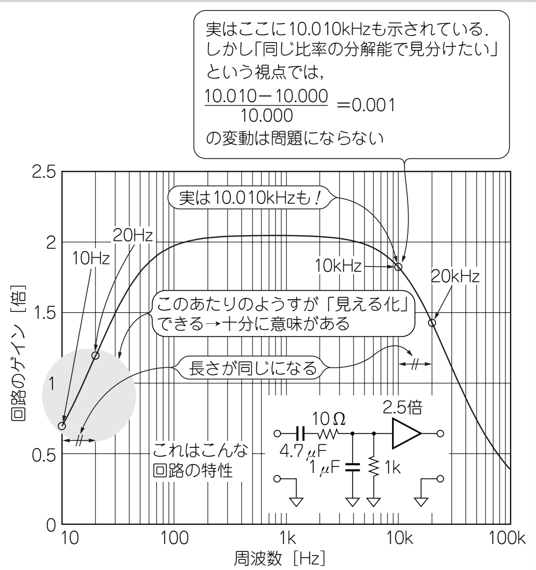

図10-3 10.000～10.010 kHzの10 Hz変動はあまり問題ではないが，10～20 Hzでの変動は十分に見る意味がある
ピアノの鍵盤の説明のとおり，固定の分解能でなく，それぞれの周波数に応じた，同じ比率の分解能で見分ける(考える)という視点が重要．

した．この特徴のためX軸を対数にすれば，**図10-3**で考えると，グラフ上でも10 Hz～20 Hzの距離と10～20 kHzでの距離が同じになります．そのため10～20 Hzのあたりの変化のようすを「見える化」させることができます．

その一方で，同じく**図10-3**に示すように「10 Hzに相当する10～10.010 kHzの間の変動は見えなくてもよいのか？」という疑問が生じます．これについては，前章のピアノの鍵盤の話で説明したとおり，それぞれの周波数に応じた**同じ比率の分解能で見分けたい**という視点では，「(10.010 kHz − 10.000 kHz) ÷ 10.000 kHz = 0.001の変動はあまり問題ではない．逆に10～20 Hzでの2倍の変動は十分に見る意味がある」ということがわかると思います．

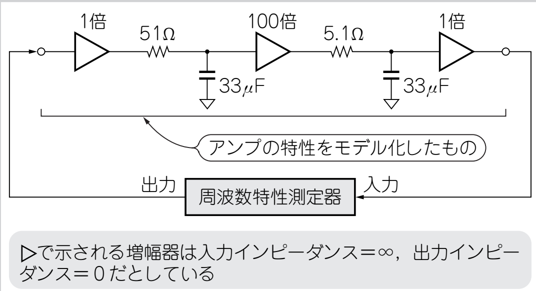

図10-4 アンプの特性をモデル化したものと，その周波数特性を測定するシステム
Y軸側の軸目盛りを対数としたいものとして，アンプの利得のグラフ化がある．ここではアンプの電圧増幅率の周波数特性を抵抗とコンデンサでモデル化している．この周波数特性を測定すると考える．

▶非常に広範囲にわたっている信号のレベルの場合も同じこと

ここまでの説明は，X軸側での軸目盛りとしてよく利用される「周波数」で説明してきました．一方で，**図10-2**のようなY軸側の軸目盛りとして利用されるもの，それ自体は多岐にわたりますが，一番多いのはアンプのゲインをグラフ化することでしょう．

このようすを**図10-4**と**図10-5**に示します．**図10-4**は，アンプの電圧増幅率の周波数特性を抵抗とコンデンサでモデル化した一例と，その周波数特性を測定するシステムです．

第11章
ツール5
時定数

信号の立ち上がりや立ち下がりにかかる時間で評価する

回路の俊敏さや緩慢さを表す「時定数」

2章に分けて時定数（じていすう）について説明します．まず，実際の回路設計現場において，時定数がどのような回路や場面で使われるかを紹介していきます．

電子回路の，ある状態でのもともとの電圧や電流の大きさから，電圧や電流の大きさが異なる状態に移っていくときに，当然ある時間がかかります．この時間的な変化速度が時定数です．

具体的な時定数の意味については後で詳しく説明しますが，まずは「なぜ時定数?」という疑問に答えられる程度で，最初に説明しておきましょう．

11-1 なぜ時定数を考えるのか

●電圧や電流の変化には時間がかかる

以下に示すように**時定数をもつ回路**での，電圧や電流の変化のようすは，X軸を時間，Y軸を電圧もしくは電流の変化率としてみると，**図11-1**のようになります(ここでは変化しているようすをパーセントで示している)．もともと落ち着いていた状態の大きさから，違う状態に変化していき，最終的にある大きさに落ち着きます．

この変化していくカーブは，これから示していく回路形状の場合，回路部品の定数により時間的な変化速度の違いはあるものの，**その形はどれも同じ**です．

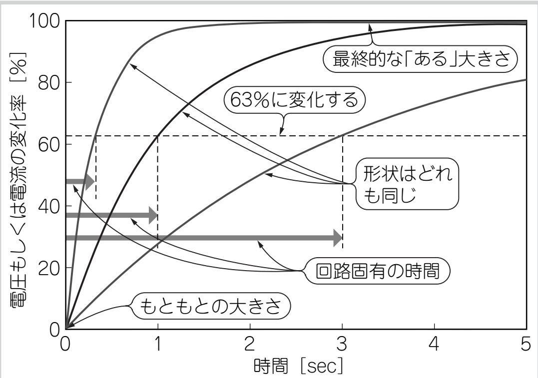

図11-1 もともとの電圧や電流の大きさから，違う状態に移っていくときに時間がかかる

回路部品の定数により時間的な変化速度の違いはあるものの，その形状はどれも同じ．そこで回路ごとの固有の時間を考える．なおこの図では，変化率をパーセントで示している．

●カーブの形状が同じなら「それぞれの差異」の基準を「時間」で決めればよい

このように，変化していくそれぞれの動きの違いを何かで表すとすれば，「異なっているものは変化速度だけ」ですから，何らかの時間(変化の経過時間)を評価基準値として決めて，**その時間がどれだけか**で回路の動作の違いを表せばよいことは，容易に思いつくでしょう．

そこで**図11-1**内に示してあるように，63%に変化(理由は後述)するまでの時間を，「その回路の変化の俊敏さと緩慢さを指し示す数値」として，「その回路固有の時間」として決めておきます．

これが**時定数**です(単位は秒[sec]，ミリ秒[ms]，マイクロ秒[μs]など)．電圧にV，電流にI，時間にtという記号を用いたように，時定数は数式上ではτ(ギリシャ文字の「タウ」)を用います(ただし表記上の話であって，本質論は何を記号として使っても同じ)．

11-2 設計現場で遭遇する時定数に関係する回路

実際のプロの回路設計現場では，時定数をさまざまな場面で検討したり議論します．なお，電子回路ではコイルと抵抗による時定数を考えることはあまり多くありません．大体はコンデンサと抵抗の回路で時定数を考えることが多いと言えます．そのため，ここでもコンデンサと抵抗の回路を例として説明しています．

●リセット回路のリセット継続時間

図11-2は，電源を入れたときにマイコン自体をリセットさせるリセット回路の例です．コンデンサCを

抵抗Rを通して充電し，図中の電圧比較回路で基準電圧の大きさとⒶ端子の電圧を比較し，基準電圧を越えたところでマイコンへのリセットを終了させます．

このリセット時間を決めるのが，抵抗RとコンデンサCです．このRとCが大きいほど，リセット時間が長く取れます．この**リセット時間**が時定数に関係します．

●信号の立ち上がり/立ち下がり時間

図11－3のような回路は，ディジタル信号伝送などでよく使うフィルタ回路です．入力端子から入ってきた信号は，信号の伝送途中で雑音が混入することがあります．そのため図中のような抵抗とコンデンサによる雑音除去回路を通して波形を整えて，それを電圧比較回路に通してきれいな(雑音をなくした)ディジタル

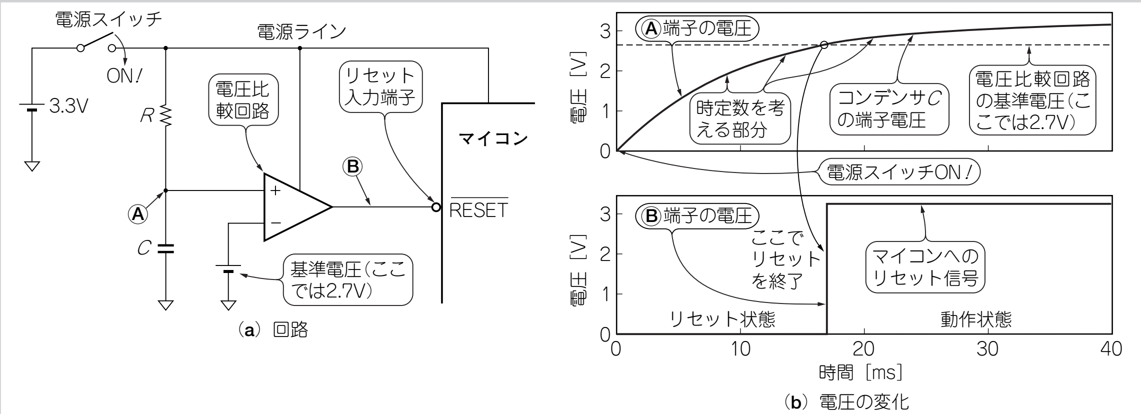

図11-2 マイコン用のリセット回路の例

コンデンサCを抵抗Rを通して充電し，ある電圧を超えたところでリセットを終了させる．このリセット時間を決めるのが抵抗RとコンデンサC．このRとCが大きいほどリセット時間が長く取れる．なお説明を単純化するためヒステリシス回路は割愛している．

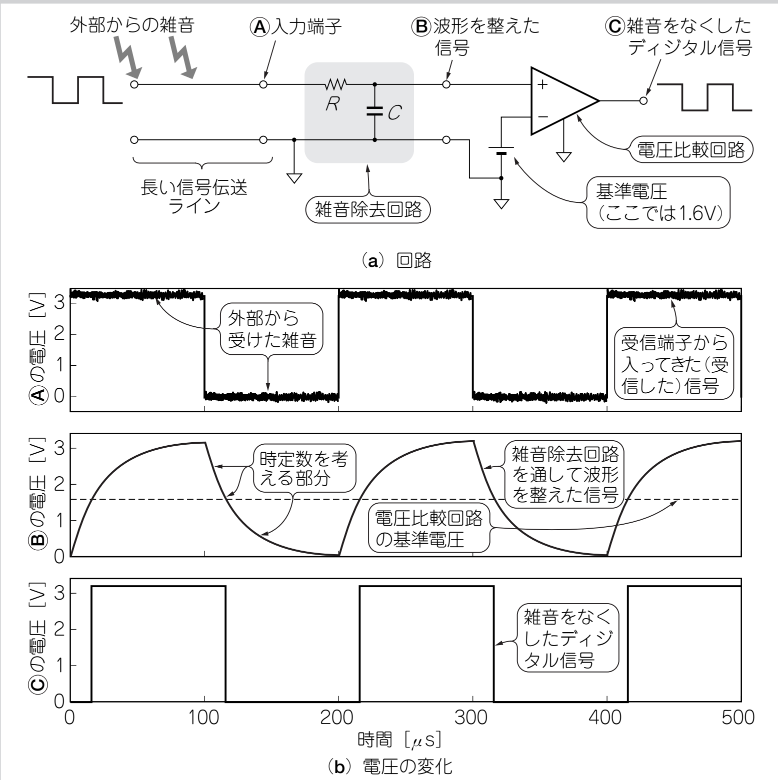

図11-3 ディジタル信号伝送での受信側でのフィルタの例

入力信号の伝送途中で混入した雑音を雑音除去回路(抵抗とコンデンサ)により波形を整え，雑音をなくしたディジタル信号を復元する．説明を単純化するためヒステリシス回路や差動受信などは省略している．なお，この例は参考回路であり最適な設計ではないので注意．

第12章 ツール5 時定数

過渡的に変化する波形あばれの制御にも挑戦

「時定数」を実際の電子回路や信号の制御に使う

第11章に引き続き，時定数（じていすう）を説明します．時定数は，ある回路での電圧や電流の大きさが切り替わったとき，その回路内部の変化状態（過渡現象）の「俊敏さや緩慢さ」を指し示す数値，ツールです．

教科書や参考書では「スイッチON！（OFFもあるが）」の過渡現象を考えています．しかし本書では電子回路らしく，電圧や電流の大きさが変化するときの過渡現象を考えます．

本章では，より深く時定数を理解するために必要なことがらについて引き続き説明していきましょう．

12-1 コイルの場合の過度現象のふるまい

前章では電子回路設計現場で実際によく出くわす，コンデンサと抵抗の回路について説明してきました．しかし一部とはいえ，コイルと抵抗を使った回路も当然ながら存在します．

そこで，ここでは簡単に，コイルと抵抗の回路での過渡現象のようすと，その時定数の考え方を紹介しておきます．

いずれにしても今の段階としては，これから説明する「1次系」（前章でも少し紹介した．**コラム12-2**を参照）の動きを理解しておけば十分です．

●コイルと抵抗の回路の時定数は $\tau = L/R$

コンデンサと抵抗の回路の時定数 τ [sec]は，$\tau = CR$ でした．コイルと抵抗の回路の時定数は $\tau = LR$ ではなく，次のようになります．

$$\tau\,[\mathrm{sec}] = \frac{L}{R} \quad \cdots\cdots (12\text{-}1)$$

ここで，L[H]はインダクタンスです．抵抗 R[Ω]が分母になります．これは注意してください．

▶コイルに流れる電流の変化量でコイルの端子電圧が決定する

コンデンサでは「だんだんとおなかがいっぱいになってくる」と説明しました（前章の**図11-7**参照）．コイルの動きは（同じリアクタンスを発生させる素子でありながら），コンデンサとはまったく正反対なのです．

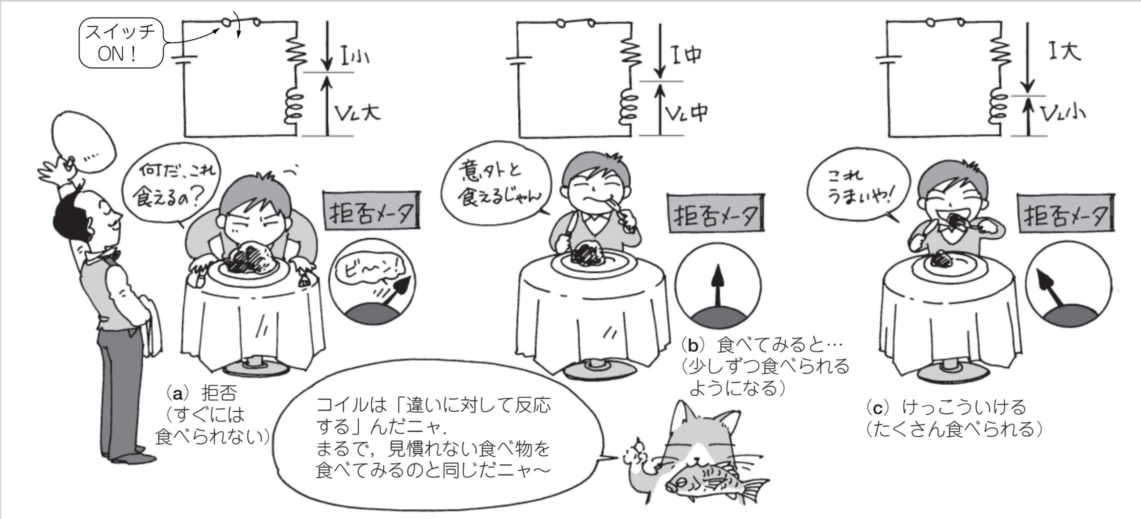

図12-1 コイルは「違いに対して反応する」

図11-7のコンデンサでは「だんだんとおなかいっぱいになってくる」と説明した．コイルも同じくリアクタンスを発生させる素子だが，コンデンサとは正反対．コイルは流れる電流の変化量で，コイルの端子電圧が決定する．この動きが以降の考え方の基本．

図12-1を見てください．コイルは，コイルに流れる電流の**変化量**でコイルの端子電圧が決定します．「コイルは違いに対して反応する」と言えるでしょう．この動きが**図12-2**以降の動きの基本になっています．

▶コイルが違いに反応するので抵抗の電圧波形は立ち上がりがダラダラになる

コイルと抵抗の回路の場合，**図12-2の立ち上がり部分**のような波形は，**図12-3(a)**の回路で見られます．これと同じ波形になるコンデンサと抵抗の組み合わせは，**図12-3(b)**の回路です．コイルやコンデンサと抵抗の位置が逆ですね．

図12-2の波形が現れる端子は，**図12-3(a)**の抵抗Rの端子電圧です．これはコイルが**違いに対して反応し，電流を急に通さない**からです．そのため抵抗の電圧波形は立ち上がりがダラダラになります．これは同図(**b**)のコンデンサの端子電圧を測定する場合と同じ波形になります．一方で，**図12-3(a)**のコイルLの端子電圧を測定すると，ここまでの説明のように，コイル自体が違いに対して反応しているようすがわかります(以後の**図12-4**，**図12-5**にも示す)．これも同図(**b**)の抵抗Rの端子電圧波形と同じなのです．

コイルとコンデンサは，それぞれリアクタンスになる素子ではありますが，ふるまいがまったく逆なのです．しかし，素子の種類と配置位置にこそ違いはあれ，**図12-3(a)**と(**b**)それぞれの出力端子で同じ電圧/電流の波形カーブになるように動いていることは，とても面白いですね．これら**図12-3**の組み合わせを「1次系」と呼びます．詳しくは**コラム12-2**を参照してください．

時定数τは，**図12-2**の矢印で示す時間長になります(電圧の大きさが最終の電圧値の63%になるまでの時間)．この波形$v(t)$を数式で表すと，次のようになります．

$$v(t)[\mathrm{V}] = V(1 - e^{-t/\tau}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12\text{-}2)$$

この式は，前章の式(11-4)と同じです．なお，$\tau = CR = L/R$であれば，**図12-2**の波形は**図12-3(a)**でも(**b**)でもまったく同じ時間軸になります．

▶コイルが違いに反応するので抵抗の電圧波形は立ち下がりも同じくダラダラになる

図12-2の立ち下がり部分のような波形も，**図12-3**の回路で見られます．ここでも，矢印で示す時間長が時定数τになっています．電圧の大きさが，最終の大きさの37%になったところが時定数τになります．変化するカーブの進み具合で考えれば，63%(100%−37%＝63%)なわけですね．

ここでも，時定数$\tau = L/R$です．この波形を数式で表すと，次のようになります．

$$v(t)[\mathrm{V}] = Ve^{-t/\tau} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (12\text{-}3)$$

この式は，前章の式(11-5)と同じですね．

▶コイル自体は違いに反応するので立ち上がりが急峻

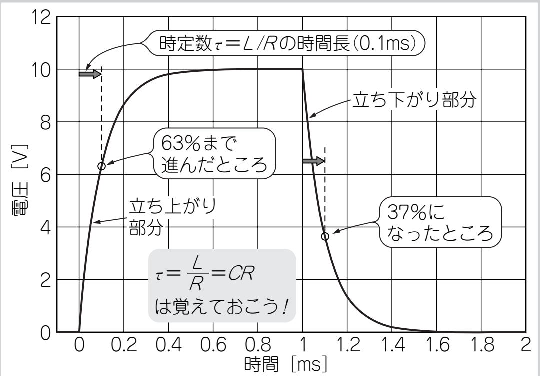

図12-2 立ち上がり/立ち下がりがダラダラとしていく電圧波形は図12-3(a)の抵抗の端子電圧

ここでは，V＝10 V，L＝1 mH，R＝10 Ωとしている．これと同じ波形になるコンデンサと抵抗の組み合わせは図12-3(b)の回路であり，その回路のコンデンサの端子の電圧に相当する．コイル/コンデンサと抵抗の位置関係が逆である．

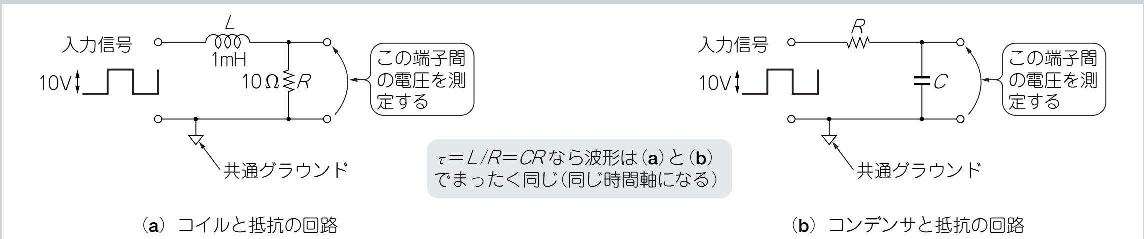

図12-3 図12-2の波形になる回路の例

図12-2の電圧波形を示す端子は，(a)の抵抗Rの端子と(b)のコンデンサCの端子になる．(a)のコイルLの端子電圧は，(b)の抵抗Rの端子電圧と同じ．これは同じリアクタンス量だが振る舞いが異なるため．しかし素子の位置は違っても，同じ電圧/電流の波形カーブになる．