[電子回路入門の入門（Ⅱ）－楽して学ぶシリーズ]

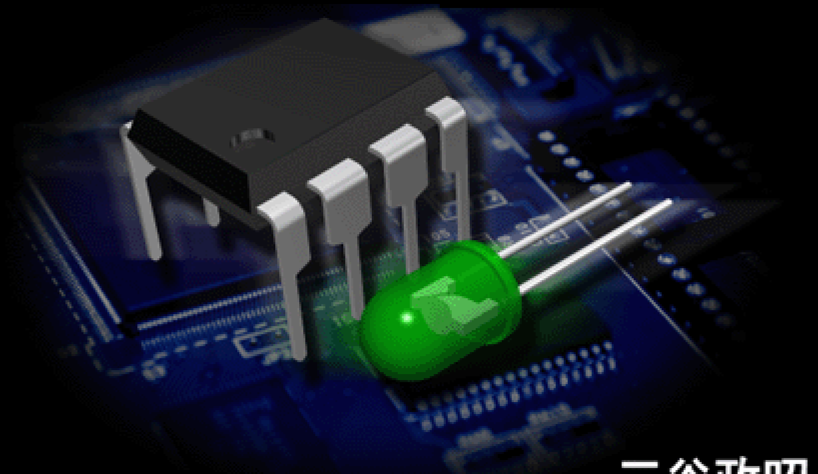
メイン　第１章　第２章　第３章　操作方法　実験室　各種設定の変更　本書の情報

楽して学ぶ

MICRONET CORP

わかる 電子回路入門 の入門(Ⅱ)

～オペアンプ基礎編～



東京電機大学教授　工学博士　三谷政昭　著

最初から始める　　続きから始める

【楽して学ぶ】シリーズ刊行にあたって

【楽して学ぶ】シリーズは，『回路シミュレータで試してなっとくする』ことによって直感的な理解を深める，インターネット時代に相応しいゲーム感覚を取り入れた新しい形の電子教科書＆参考書を実現するものであり，産学連携（東京電機大学と株式会社マイクロネット）の形で数年間の年月をかけてじっくりと醸成し，満を持して世の中に登場させるものです．

少々手前みそですが，電子回路とはどんなものなのかをすばやく知って，即座に活用するための“特効薬”となるように，「今日から使える，使いこなす，使いこなせる」ための基礎を小気味よく解説してあります．

「開けてビックリ！！　玉手箱」じゃあないけれど，本シリーズのテキスト（CD－ROM）をパソコンに突っ込んで，スイッチオン．すると，どうでしょう．仕掛け絵本のように，回路図，回路部品，工作道具，オシロスコープなどが飛び出してきます．また，テキストの説明をゆっくりカーソルでなぞってもらうと，いろいろなところに“アッと驚く（？）”仕掛けが隠されています（宝探しゲームのつもりで楽しんでください）．そのうえ，テキストの説明を読みながら，回路の仮想実験が体感できて，エレクトロニクス（電子工学）の基礎から応用までを習得できるように，いろいろな工夫がしてあります．

(1)　数式の使用をできるだけ避けること

数式は一つの言葉なので，物理的なイメージと結びつけることが大切です．ただやみくもに数式を暗記するだけでは，内容がさっぱりわからないというジレンマに陥ってしまいます（いわゆる，「理数離れ」症候群）．そのため，数式の表現力に頼ることをできるだけ避けて，数式を物理的な言葉で“翻訳”した表現を心がけ，みなさんの「数式に対するアレルギー」を取り去ってもらいます．

(2)　説明の順序を理解しやすい並びにすること

みなさんの理解しやすいことを目標に，いままでの電子回路の参考書にありがちな内容説明の流れにとらわれず自由な形で構成しました．

(3)　サーキット・マインド（回路のきもち）を育むこと

身近な「たとえ」をできるだけ利用して，直感的な理解，イメージをみなさんに植え付けます．なぜなら，物の本質の理解には順序だった（へ？）理屈も大切ですが，これ以上に重要なものは「直感的な理解，イメージ」なのですから（筆者の経験から言えることですが，....）．

本シリーズは，電子回路が初めてという人，専門書を読んではみたが難しくてどうもとっつきにくい，わかりにくいと困っている人をとくに意識して，わかりやすく解説してあります．なお，すでに勉強したことがある人でも，副読本や復習のための参考として役立ててもらえるものと思います．

また，内容説明には図・写真・イラストをふんだんに使い，わかりやすく系統立てて段階的に習得できるようになっていますから，しっかりと読み進めていく過程において，短期間に電子回路の基礎から応用までの必須知識をスムーズに身につけてもらえるものと確信しています．

最後まで読破したあとには，web サイトに「チェック問題」があります．どのぐらいの実力がついたのか，確認ができます．サイトはこちら（要登録）

最後に，【楽して学ぶ】シリーズを読破されたみなさんには，実践的な経験を通して，電子回路を使いこなせる技術者として活躍されんことを期待しつつ，筆を置くことにします．

平成 17 年 9 月　　　　三谷政昭

目次

第１章
オペアンプ回路の計算で必要な基礎知識

従来の電気・電子回路の計算ではほとんどの場合，まず“オームの法則”や“キルヒホッフの法則”を使って，電流（あるいは電圧）に関する複数の回路方程式を作成し，それらを連立して解を求めます．次に，得られた解を回路方程式に代入して，抵抗やインピーダンス（あるいはアドミタンス）による電圧降下や電流を算出することになります．

一方，オペアンプ回路における計算は，ふつうの電気・電子回路の計算とほとんど同じですが，いくつかのオペアンプ回路特有の計算手法があります．これらを理解しておくと，オペアンプ回路の解析計算の効率が上がり，結果をより早く求めることができます．ただ，効率よく目的の諸量（出力電圧，電圧利得，入出力インピーダンスなど）を算出するには，多くの経験が必要で，とくにオペアンプ回路を表現するときに重要となるナレータ，ノレータの考え方，および回路計算法に習熟していると何かと重宝します．

まずは，例題を解くプロセスを体験してもらうことにより，オペアンプ回路解析上の基本計算の流れを理解し，さらには“**楽して学ぶシリーズ**”のために自社開発した**回路シミュレータ・ソフトウェア『CircuitViewer（サーキット・ビューア）』**を利用しながら，仮想的な回路実験を行って，効率よい学習ができるように配慮しています．回路シミュレータでは，電源機能付きと電源機能なしの二つのオペアンプが用意されています（図 1－1）．

（a）　電源機能付き　　　（b）　電源機能なし

図 1－1 回路シミュレータで使用するオペアンプ

それでは，オペアンプ回路の計算で必要となる基本法則の復習から始めましょう．なお，解説の途中の例題には［　　］（空欄）がありますので，良く考えて正しいと思う数値（半角）をパソコンのキーボードから入力してください．記入後，マウスのカーソルで採点ボタンをクリックしてもらうと正解のときには「○」が付きます．

その際，どうしても正解を見い出せなければ ［サイトはこちら（要登録）］ **を参照して下さい．**

また、本書の中でいくつか空欄のある図や表（表題の後に(Excel)とあるもの）が出てきますが、それらは予め Microsoft社の Excelがインストールされていないと動きませんのでご了承下さい．

１－４　合成抵抗値の計算

図１－13 の各回路の合成抵抗値を，計算公式に頼らないで求めてみることにしましょう．もちろん，抵抗値を求める基本はオームとキルヒホッフの二つの基本法則にあります．

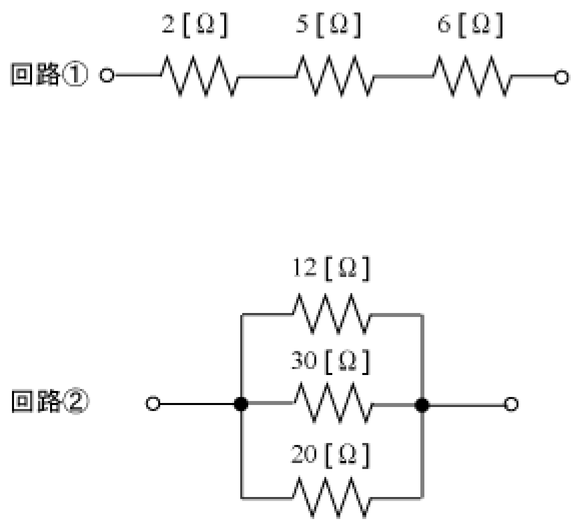


図１－13　合成抵抗値を求める

（回路①）　適当な大きさ電流，たとえば I =5 [A] を回路に流したとしましょう．このとき，各抵抗の電位差はそれぞれ 10 [V]，25 [V]，30 [V] なので，3 つの抵抗全体での電位差 E は =10+25+30=65 [V] です（図１－14）．したがって，オームの法則より，合成抵抗値 R_T は，

$$R_T[\Omega] = \frac{E[\mathrm{V}]}{I[\mathrm{A}]} = \frac{65[\mathrm{V}]}{5[\mathrm{A}]} = 13[\Omega] \qquad (1-10)$$

となります．

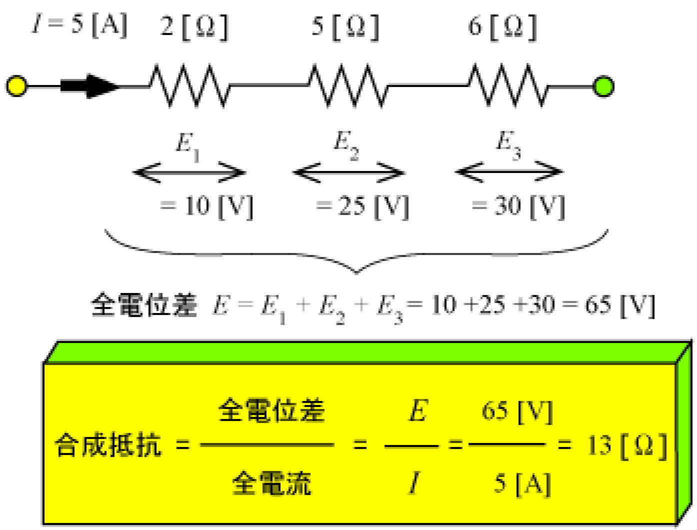


図１－14　回路①の合成抵抗値の考え方

以上より，合成抵抗値を求める計算公式として，次のように一般化することができます（図１－16）．

【直列接続（各抵抗に流れる電流がすべて同じ）】

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_K \qquad (1-12)$$

【並列接続（各抵抗にかかる電圧がすべて同じ）】

$R_T^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} + \cdots + R_K^{-1}$，すなわち，

$\dfrac{1}{R_T} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \cdots + \dfrac{1}{R_K}$ となる関係より，

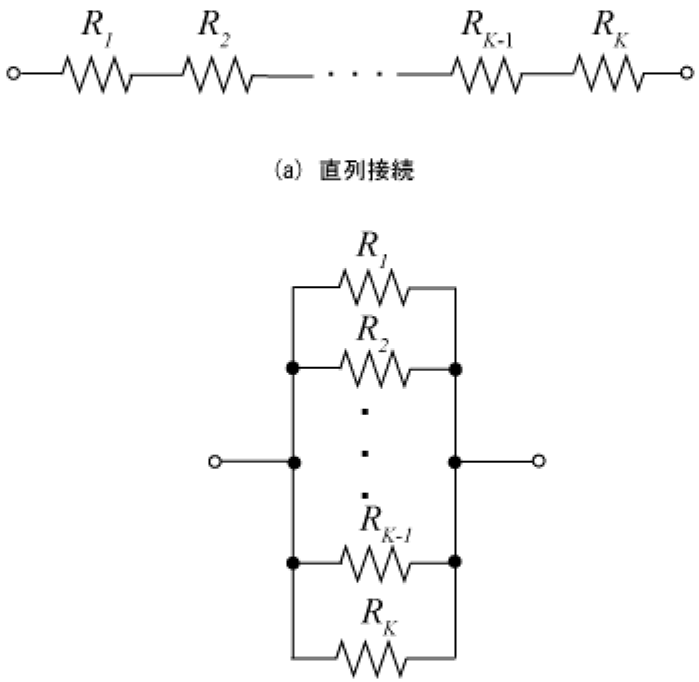
$$R_T = \frac{1}{R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} + \cdots + R_K^{-1}} \qquad (1-13)$$

ここで $R_T = R_1 // R_2 // R_3 // \cdots // R_K$ と表記することもあります．

とくに，２つの抵抗の場合は，

$$R_T = \frac{1}{R_1^{-1} + R_2^{-1}} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\text{抵抗の積}}{\text{抵抗の和}} \qquad (1-14)$$

であり，$R_T = R_1 // R_2$ の形式で表現されることも多いので，覚えておくと便利です．



(a) 直列接続

(b) 並列接続

図１－16　合成抵抗値の一般式

１－１０　ナレータとノレータ

さて，オペアンプを含む電子回路を解析･設計していく際に，簡略化した解析手法があればたいへん便利で，“ナレータ”と“ノレータ”という仮想的な回路素子を用いる方法が知られています．おそらく初めての回路素子だろうと思いますので，どんな電気的性質を有するのかを説明しておきましょう．

【ナレータ】

図１－35は，ナレータという仮想的な回路素子の図記号で，

「二つの端子間の電圧も電流もゼロ（0）になる」

という性質を有しています．

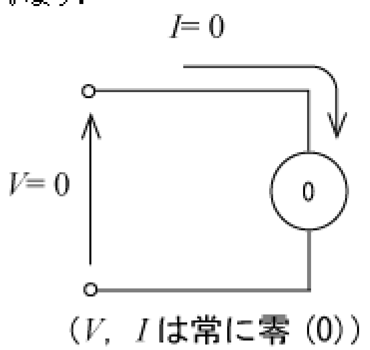


図１－35　ナレータ

【ノレータ】

図１－36は，ノレータとよばれる仮想的な回路素子の図記号で，

「二つの端子間の電圧も電流も任意の値を採ることができ，まわりの回路を計算することによって電圧と電流が決定される」

という性質があります．

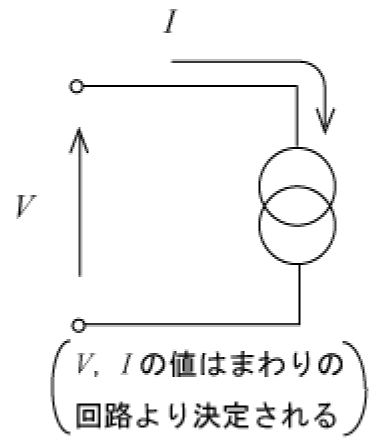


図１－36　ノレータ

このように，ノレータはオペアンプのまわりの電圧，電流から決められるわけですから回路解析には利用できません．したがって，ナレータのもつ『電圧もゼロ，電流もゼロ』という性質を中心に据えて，線形性を有する範囲でオペアンプ回路を解析していくことになります．

２－２　オペアンプの回路図表示　電位と電位差

図２－６は，もっともよく見かけるオペアンプの図記号で，２つの入力端子（同相入力端子（＋），逆相入力端子（－）），出力端子，および２つの電源端子（正電源端子，負電源端子）という，合計５つの端子があります．でも，図２－１のオペアンプには８本の端子（足）が付いていました．このうちの５本は前述の端子に相当しますが，残りの３本は特殊な用途の端子で，オペアンプの特性をできるだけ，理想に近づけるために使用されることがありますが，ここでは何も接続しないで用いています（これでも十分な性能が得られます）．

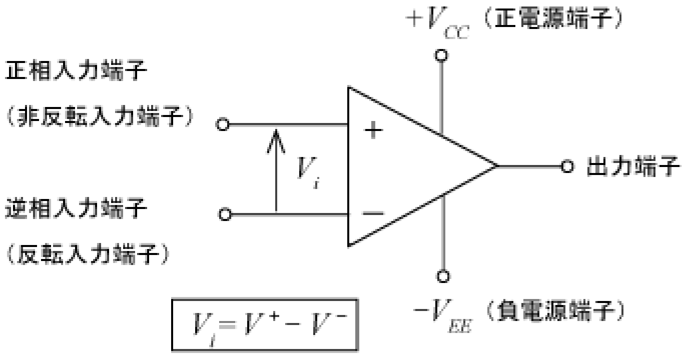
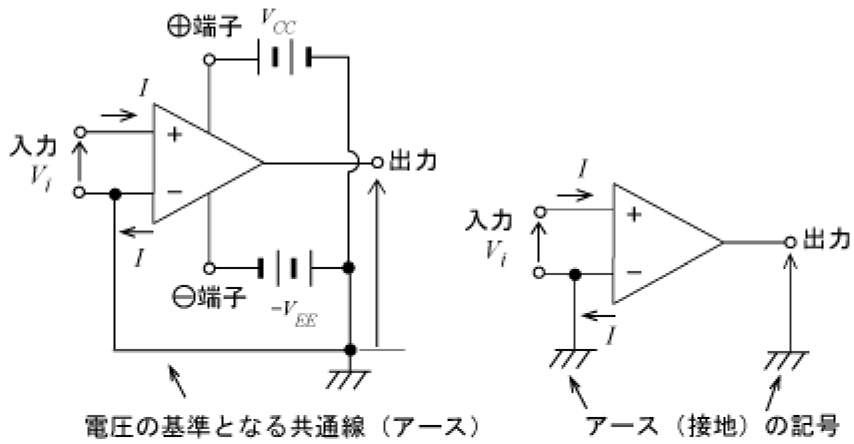


図２－６　オペアンプの図記号

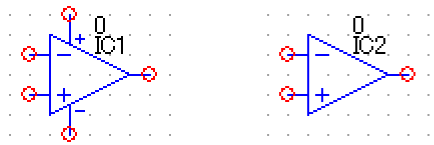
オペアンプを利用するときは，図２－７（a）に示すように電源電圧をかけます．具体的には，⊕ 端子には正の直流電源（V_{CC}）を，また⊖ 端子には負の直流電源（V_{EE}）をつなぎます．正負いずれの電源も図に示すように，共通の電圧の基準となる線と，オペアンプの電源端子との間に接続します．この２つの電源は，オペアンプを働かせるための電源となります．

なお，オペアンプの２つの直流電源は，回路図表示では省略して，図２－７（b）のような図記号で表す場合が多いです．回路シミュレータにも，電源機能付きと電源機能なしの２つのオペアンプが用意されています（図２－８）．



（a）接続図　（b）簡略図

図２－７　オペアンプの回路図表現

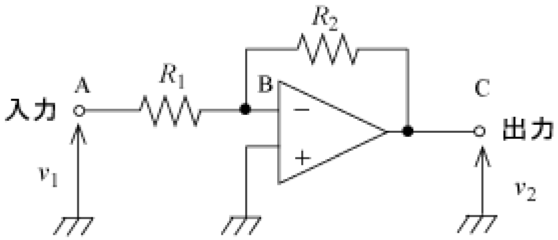


（a）電源機能付き　（b）電源機能なし

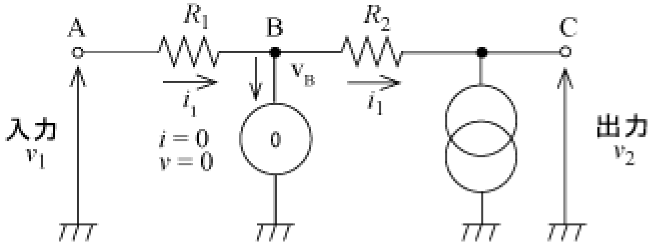
図２－８　回路シミュレータで使用するオペアンプの図記号

２－９　反転増幅器　（逆相増幅器）

いま，図 2－26（a）に示すオペアンプを用いた基本増幅回路を考えてみます．図 2－21 のナレータ・ノレータモデルを，等価回路を書いてみると同図（b）が得られます．ナレータの端子間の電圧はゼロ（オペアンプの性質①による）なので，B 点はアース（=0［V］）されることになりますから，B 点の電位 v_B =0［V］となります．



（a）　基本回路



（b）　ナレータ，ノレータによる等価回路

図 2－26 反転増幅器

したがって，抵抗 R_1 に流れる電流 i_1 は，オームの法則より，

$$i_1 = \frac{v_1 - v_B}{R_1} = \frac{v_1 - 0}{R_1} = \frac{v_1}{R_1} \qquad (2-15)$$

であり，ナレータには電流が流れない（オペアンプの性質②による）ことから，

抵抗 R_1（**入力抵抗**という）に流れる電流 i_1 はすべて抵抗 R_2（**帰還抵抗**という）に流れることになります．これより，オペアンプの出力電圧 v_2（ノレータの端子電圧に相当）は，

$$v_2 = v_B - R_2 i_1 = 0 - R_2 i_1 = -R_2 i_1 \qquad (2-16)$$

となり，式（2－15）を代入して i_1 を消去すれば，

$$v_2 = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) v_1 \qquad (2-17)$$

という結果が得られます．このとき，電圧利得 G は，

$$G = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (2-18)$$

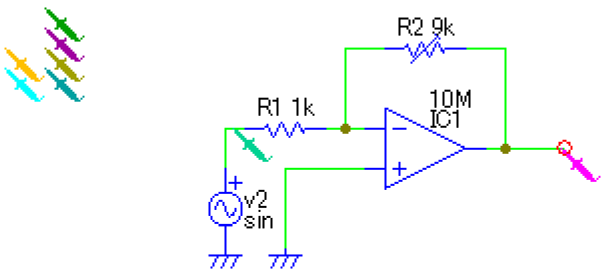
となり，2 つの抵抗 R_1，R_2 の比で決まることがわかります（**１－１１**を参照）．

たとえば，R_1 =1［kΩ］，R_2 =10［kΩ］にすれば，（－10）倍，すなわち入力を 10 倍した出力が得られる増幅回路が，オペアンプを使用すれば実に簡単に作成できるのです．ここで，式（2－17），式（2－18）におけるマイナス記号は，入力電圧と出力電圧の位相が逆相である（波形の正負が反転する）ことを表しています．このことから，図 2－26（a）の回路は，“反転増幅器（あるいは逆相増幅器）”とよばれています．

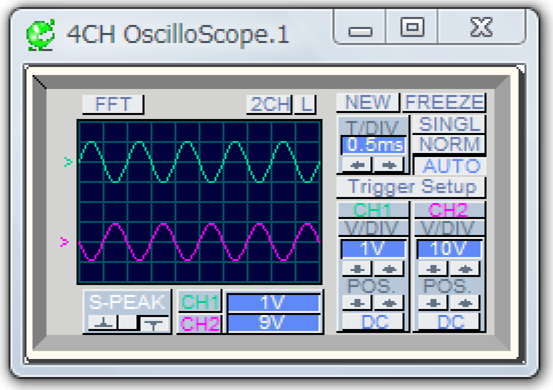
また，反転増幅器はアナログ的に“かけ算（乗算）”をする回路とみなすこともできますし，“わり算（除算）”をする回路にもなります．

たとえば，R_1 =5［kΩ］，R_2 =1［kΩ］に選べば，「5 で割る除算回路（または，0.2 を掛ける乗算回路）」というわけです．ここで，電圧利得が 1 より小さい場合，とくに“減衰器”とよばれることもあります．

実際に回路シミュレータで R_1 =1[kΩ], R_2 =10[kΩ] の反転増幅器を作成し，（−10）倍された出力信号が得られることをオシロスコープで確認してください（図２−27）．ここで，抵抗 R2 は可変抵抗ですので，いろいろな値に変えて，出力信号の大きさの違いを調べてみましょう（素子値の変更方法）．



（a）　実験回路



（b）入出力波形

図２−27　反転増幅器

表２−１　G ＝−10 を実現する抵抗値

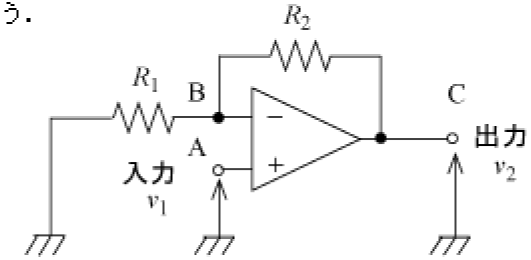
	R1	R2
①	1[Ω]	10[Ω]
②	1[kΩ]	10[kΩ]
③	20[kΩ]	200[kΩ]
④	2[MΩ]	20[MΩ]

ところで，反転増幅器の電圧利得は式（2−18）に示すように，二つの抵抗値の比で決まることから，式の上だけでは R_1 と R_2 の大きさ自体はどんな値であってもよいようにみえます．たとえば表２−１のような抵抗値の組み合わせは，いずれも計算上では G ＝−10 倍を実現できるわけですが，この中で正常に働くのは②と③の場合だけです．①の抵抗値では，入力インピーダンスが１[Ω] となり，電圧増幅回路としては小さすぎるのです．また，オペアンプの出力に流れる電流（出力電流という）が大きくなりすぎて，オペアンプに流せる最大の出力電流を超えてしまうことにもなります．

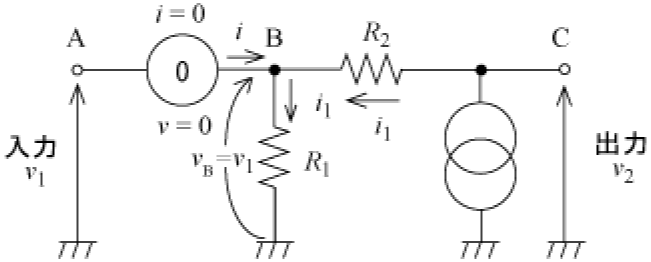
また，④は①とは逆に抵抗値が大きすぎて，オペアンプの入力インピーダンス，入力端子の電流，浮遊容量，雑音などの影響を受けやすくなるため，好ましくありません．通常，オペアンプを利用した回路では，使用する抵抗の値は１[kΩ] 〜1000[kΩ]（=1[MΩ]）程度と思っておいて下さい．

２－１０　非反転増幅器　（同相増幅器）

もう一つ代表的な基本増幅回路，図2－28（a）を解析してみましょう．この場合もナレータとノレータで表すと，同図（b）の等価回路が書けますから，早速解析を始めましょう．



（a）　基本回路



（b）　ナレータ，ノレータによる等価回路

図2－28　非反転増幅器

まず，ナレータの電圧がゼロ（オペアンプの性質①による）という性質から，B点にはオペアンプの（＋）端子のA点の電位 v_1（入力電圧）がかかります．

$$v_B = v_1 \qquad (2-19)$$

この電圧 v_1 が抵抗 R_1 にかかるわけで，R_1 に流れる電流 i_1 はオームの法則より，

$$i_1 = \frac{v_1}{R_1} \qquad (2-20)$$

と求まります．ナレータの電流がゼロ（オペアンプの性質②による）であることを考慮すれば，電流 i_1 がそのまま抵抗 R_2 に流れるわけです．よって，C点からB点に向かって電流 i_1 が流れているので，C点の電位 v_2（出力電圧）がB点の電位 v_B より高いわけですから，

$$v_2 = v_B + R_2 i_1 \qquad (2-21)$$

となります．式（2－19）と式（2－20）を，式（2－21）に代入することにより，

$$v_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_1 \qquad (2-22)$$

という結果が得られます．このとき，電圧利得は，

$$G = \frac{v_2}{v_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \qquad (2-23)$$

となります．この場合は，入力と出力の波形は同相（位相差がゼロ）で二つの抵抗 R_1，R_2 の比で決まることがわかります．このとき，反転増幅器と同様に，二つの抵抗値としては1[kΩ]～1000[kΩ]（=1[MΩ]）程度のものを使用します．

たとえば，R_1=1[kΩ]，R_2=9[kΩ]とすれば，G=10倍，すなわち入力電圧を10倍した大きさの電圧を出力する増幅回路が，オペアンプを使用すれば実に簡単に作成できるのです．ここで，式（2－22），式（2－23）においては電圧利得が正符号，すなわち入力電圧と出力電圧の位相が同相である（波形の正負が一致する）ことを表しています．このことから，図2－28（a）の回路は，“非反転増幅器（あるいは，同相増幅器）”とよばれています．なお，非反転増幅器では，電圧利得 G を1以下にすることができないので，減衰器として使用することはできません．

３－１　２入力加算回路

オペアンプを使用すると，電圧を加えることができます．図３－１は，二つの電圧を（－）端子に入れているので，出力が反転する“反転加算回路”です．出力電圧 v_{out} は入力電圧 v_1 と v_2 の和で，反転出力されてマイナス符号（－）が付きます．たとえば，入力電圧を v_1 =2［V］，v_2 =3［V］に設定すると，出力につないだディジタル・テスタの表示電圧から v_{out} =－5［V］になることがわかりますね．いろいろな値の電圧を入力し，入力電圧と出力電圧の関係を推測してみてください．

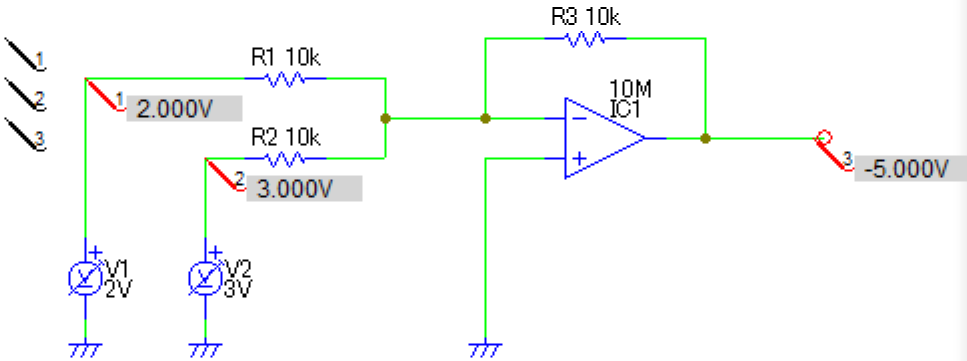


図３－１　２入力加算回路

それでは，オペアンプのナレータ・ノレータ等価モデル（２－７参照）を適用して，入出力関係を理論的に求めてみます．等価回路は図３－２ですから，ナレータの性質（電圧降下は０［V］）を適用すれば，端子Ａの電位 v_A はアース電位と同じで，

$$v_A = 0\ [\mathrm{V}] \qquad (3-1)$$

となります．このとき，オームの法則より，抵抗 R_1，R_2 を流れる電流 i_1 と i_2 はそれぞれ，

$$i_1 = \frac{v_1 - v_A}{R_1} = \frac{v_1 - 0}{R_1} = \frac{v_1}{R_1},\quad i_2 = \frac{v_2 - v_A}{R_2} = \frac{v_2 - 0}{R_2} = \frac{v_2}{R_2} \qquad (3-2)$$

と表せます．さらに，ナレータの性質（電流は０［A］）より，入力電圧 v_1 による電流 i_1 と v_2 による電流 i_2 の和が抵抗 R_f に流れ込む電流 i に等しく，

$$i = i_1 + i_2 \qquad (3-3)$$

になります．よって，出力電圧 v_{out} はＡ点の電位 v_A より抵抗 R_f の電圧降下分だけ低くなるわけですから，

$$v_{out} = v_A - R_f i \qquad (3-4)$$

であり，式（３－１）～（３－３）の関係を代入して計算すれば，

$$v_{out} = 0 - R_f(i_1 + i_2) = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2\right) \qquad (3-5)$$

となります．ここで，３つの抵抗はすべて10［kΩ］なので，式（３－５）より，

$$v_{out} = -(v_1 + v_2) \qquad (3-6)$$

と最終結果が得られます．以上より，出力電圧 v_{out} は入力電圧 v_1，v_2 の和になり，反転するのでマイナス符号が付くことがわかります．

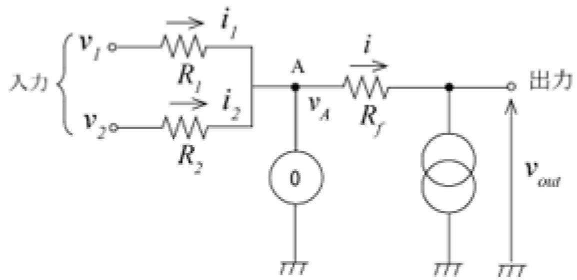


図３－２　２入力加算回路の等価回路

でも，マイナス符号を付いているのはどうもね，と言われる方がおそらく多いのではないかな？　どうしても気になるという人のために，マイナス符号を取り去ってあげましょう（そのヒントは，**２－１２　「符号反転回路」** にあります）．つまり，図３－１の２入力加算回路の出力端子に符号反転回路を接続するだけでよいのです（図３－３）．みなさん，図３－３にディジタル・テスタを入出力端子に当てて出力電圧を測定し，表３－１の空欄を埋めてください（「なるほど」と納得してもらえると，うれしいですね．もし，迷ったときはこちらへ）．

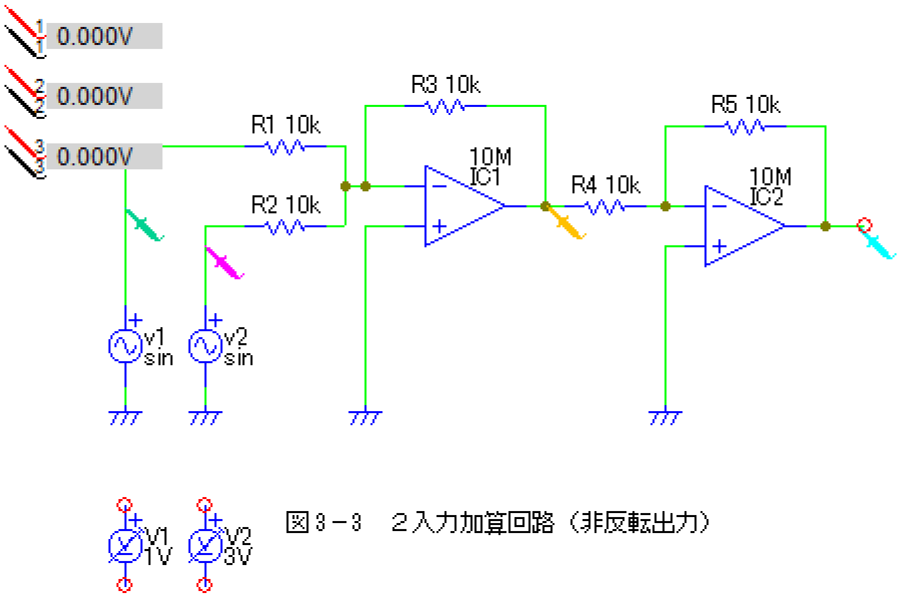


図３－３　２入力加算回路（非反転出力）

表３－１　２入力加算器の実験結果（Excel）

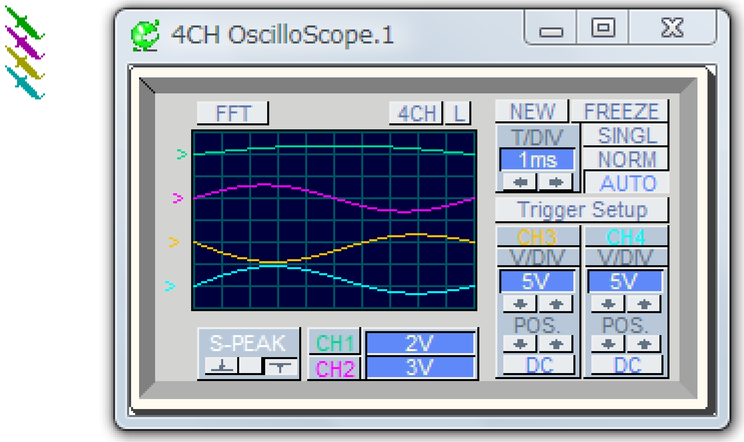
入力電圧 V1[V]	入力電圧 V2[V]	出力電圧 Vout[V]	理論値 V1+V2[V]
2.00	3.00		5.00
-3.00	2.00		-1.00
-3.00	-4.00		-7.00
5.00	-7.00		-2.00
5.00	4.00		9.00
5.00	5.00		10.00
5.00	6.00		11.00
-5.00	-4.00		-9.00
-5.00	-5.00		-10.00
-5.00	-8.00		-13.00

次に，周波数の異なる二つの入力 v_1 と v_2 をそれぞれ，

$$v_1(t) = 2\sin(100\pi t)$$

$$v_2(t) = 3\sin(200\pi t)$$

として，加算した出力 $v_{out}(t) = v_1(t) + v_2(t)$ をオシロスコープで観測してみましょう（回路部品の移動方法はこちらへ）．



３－４　多入力重み付き加算回路

３－１「２入力加算回路」を手本に，こんどは重み付きの多入力加算回路に挑戦です．ここでは，３入力の加算回路を例にとって説明していきます（図３－８）．

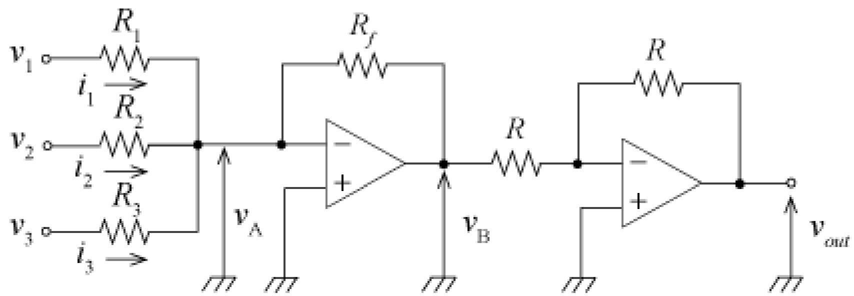
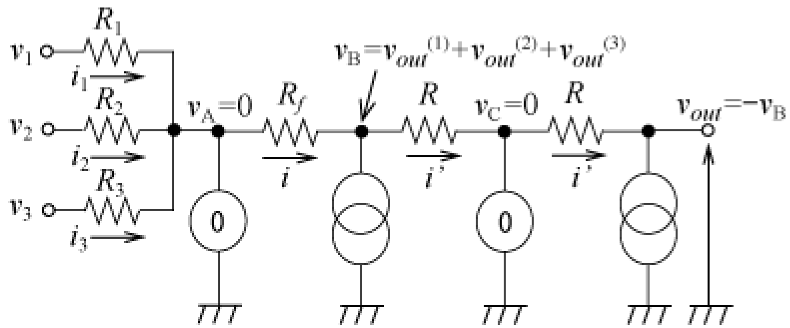


図３－８　多入力重み付き加算回路（３入力）



$$i = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} \qquad i' = \frac{v_B - v_C}{R} = \frac{v_B}{R} \qquad v_{out} = Ri'$$

図３－９　重み付き加算回路（３入力）の等価回路

前頁

まずは，反転増幅器で得られる電圧利得が入力抵抗と帰還抵抗の比率によって決まりまることを思い起こして下さい．この電圧利得の計算方法は，多入力加算回路でも変わりません．多入力の場合は，入力端子ごとに計算して，たし合わせるだけでよいのです．それでは，ナレータとノレータによる等価回路（図３－９）を作成し，理論計算をしてみましょう．

入力 v_1 に対する出力電圧 $v_{out}^{(1)}$ は R_2，R_3 は気にせずに，反転増幅器の利得（式（２－17），式（２－18））を適用して，

$$v_{out}^{(1)} = G^{(1)} v_1 = -\frac{R_f}{R_1} v_1 \tag{3-17}$$

と計算できます．同様に，入力 v_2 と v_3 に対する出力電圧はそれぞれ，

$$v_{out}^{(2)} = G^{(2)} v_2 = -\frac{R_f}{R_2} v_2 \tag{3-18}$$

$$v_{out}^{(3)} = G^{(3)} v_3 = -\frac{R_f}{R_3} v_3 \tag{3-19}$$

となり，三つの出力を加え合わせて符号反転させた出力電圧 v_{out} は最終的に，

$$\begin{aligned} v_{out} &= -\left(v_{out}^{(1)} v_1 + v_{out}^{(2)} v_2 + v_{out}^{(3)} v_3\right) \\ &= -\left(G^{(1)} v_1 + G^{(2)} v_2 + G^{(3)} v_3\right) \qquad (3-20) \\ &= \frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2} v_2 + \frac{R_f}{R_3} v_3 \end{aligned}$$

と求まります．

次頁

次に，図３－10 に示す回路において，v_1［V］，v_2［V］，v_3［V］を入力してみましょう．このとき，ディジタル・テスタに表示される電圧値を読んでみると，出力電圧は v_{out}=4［V］となります．式（3－20）に基づく理論値は，R_1=2［kΩ］，R_2=3［kΩ］，R_3=6［kΩ］，R_f=6［kΩ］を代入すれば，

$$v_{out} = 3v_1 + 2v_2 + v_3$$
$$= 3\times1[\mathrm{V}] + 2\times2[\mathrm{V}] + 1\times(-3[\mathrm{V}]) = 4[\mathrm{V}] \qquad (3-21)$$

となります．また，ディジタル・テスタで出力端子の電圧 v_{out} を測ってみましょう．電圧を測ると 4.0［V］であり，式（3－20）の理論式が正しいことが裏付けられます．入力電圧や抵抗をいろいろな値に設定して多入力加算回路の動作を調べてみてください（電圧や抵抗の変更方法）．

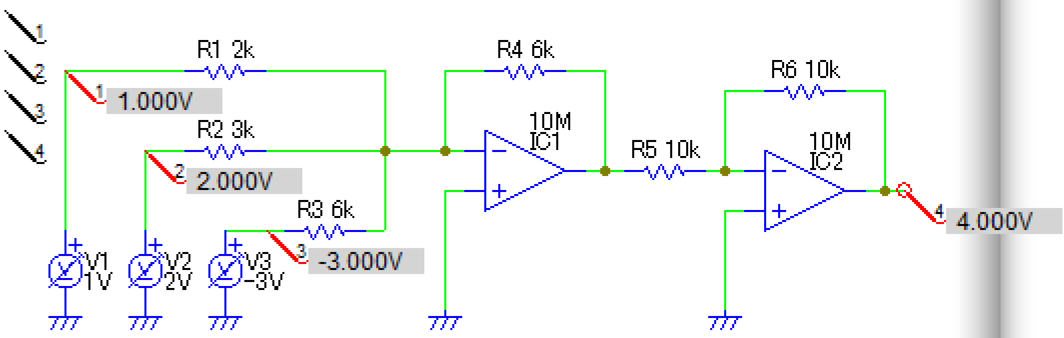


図３－10　重み付き加算回路（３入力）のシミュレーション実験

また，入力を SG（シグナルジェネレータ）とし，正弦波と三角波を入力して波形の和が得られることも体験しておきましょう（図３－11）．このとき，オシロスコープ上に波形を表示した後，**FREEZE** ボタンをクリックしてください．

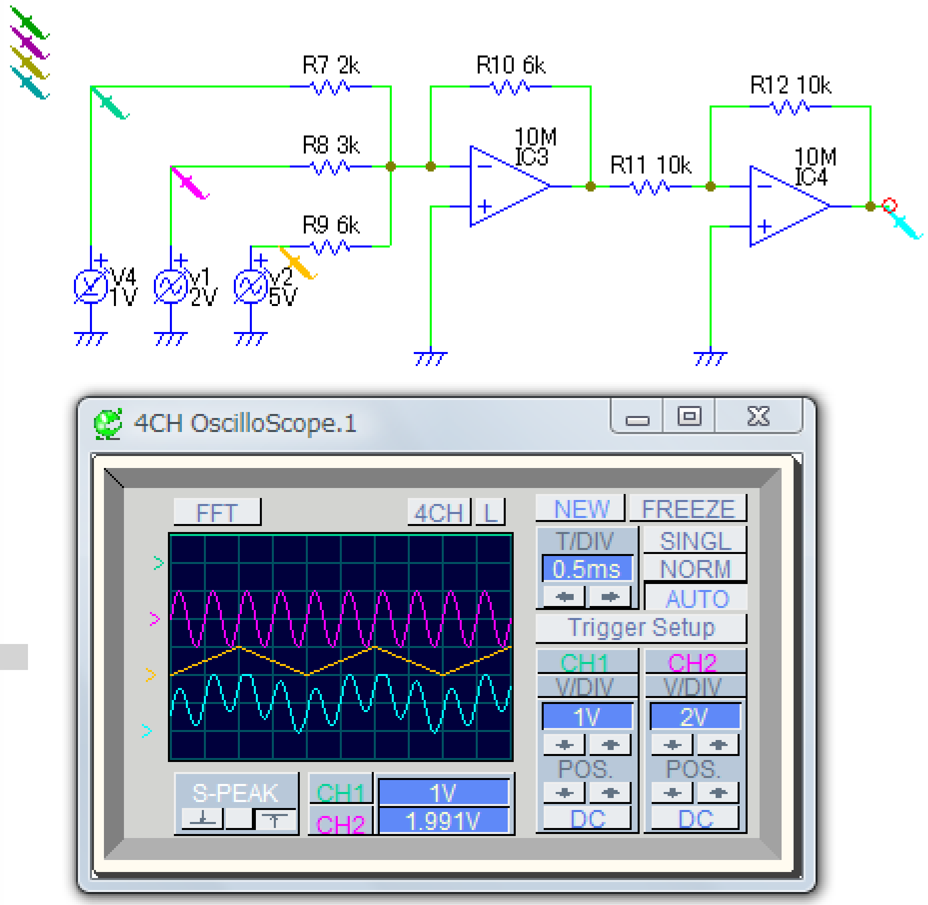


図３－11　入出力波形

３－８　積分回路

次は，微分の逆の動作をさせる積分回路です．積分回路も超簡単で，基本的には図 3－17 の微分回路の抵抗とコンデンサを入れ換えるだけで実現できます（図 3－24）．入力電圧を時間について積分した電圧が出力されるわけですから，図 3－25 に示すコンデンサの電圧がコンデンサに流れる電流の時間積分したものに比例するという性質，すなわち，

$$v(t)=\frac{1}{C}\int i(t)dt \qquad (3-41)$$

の積分関係を利用します．C はコンデンサの容量で，単位はファラッド [F] です．

図 3－24 の等価回路は図 3－26 であり，A 点の電位 $v_A(t)$=0 [V] であることから，

$$i(t)=\frac{v_1(t)-v_A(t)}{R_s}=\frac{v_1(t)}{R_s} \qquad (3-42)$$

となります．この抵抗に流れる電流 $i(t)$ はそのままコンデンサ C に流れるので，その両端には式（3－41）で与えられる積分された電圧が，図 3－26 に示した⊕⊖の向きに発生します．したがって，出力電圧 $v_{out}(t)$ は，(－1) 倍する符号反転回路がつながっていることを考慮すれば，式 (3－41) と $v_A(t)$ =0 より，

$$v_{out}(t)=v_B(t)\times(-1)=\left\{v_A(t)-\frac{1}{C}\int i(t)dt\right\}\times(-1)=\frac{1}{C}\int i(t)dt \qquad (3-43)$$

と表せます．よって，式（3－42）を式（3－43）に代入して，

$$v_{out}(t)=\frac{1}{CR_s}\int v_1(t)dt \qquad (3-44)$$

と変形できて，入力電圧 $v_1(t)$ の積分値が得られることがわかります．ここで，コンデンサ容量と抵抗値の積（$CR_s=\tau$）は“時定数”とよばれるもので，単位は [秒] となります．

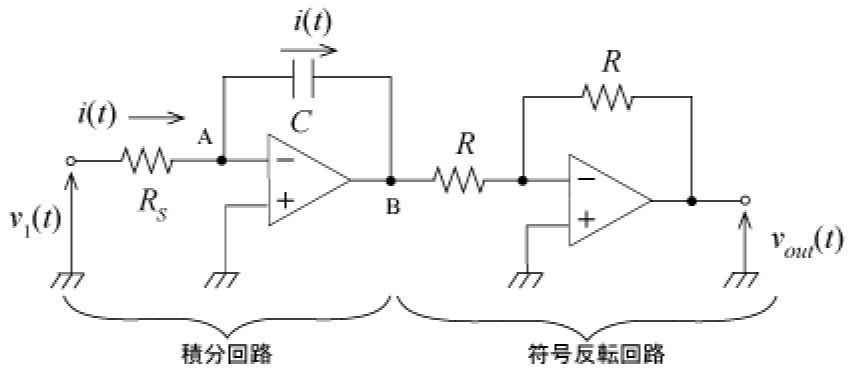


図 3－24　オペアンプを使った積分回路例

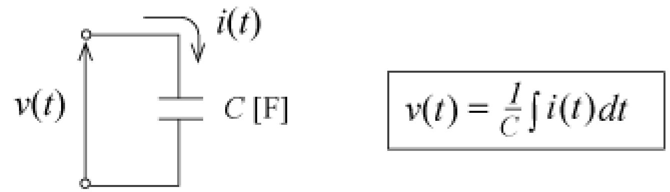


図 3－25　コンデンサの働き

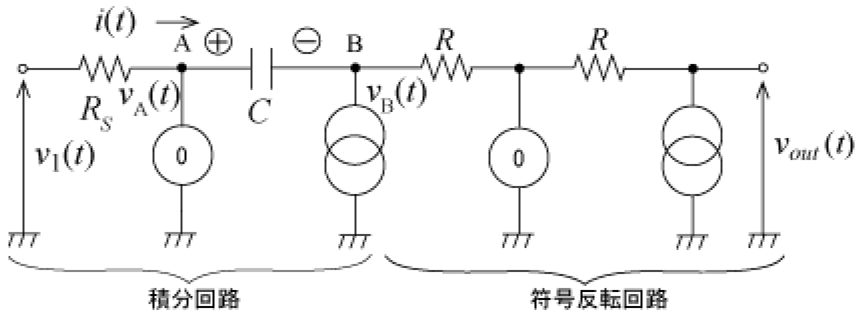
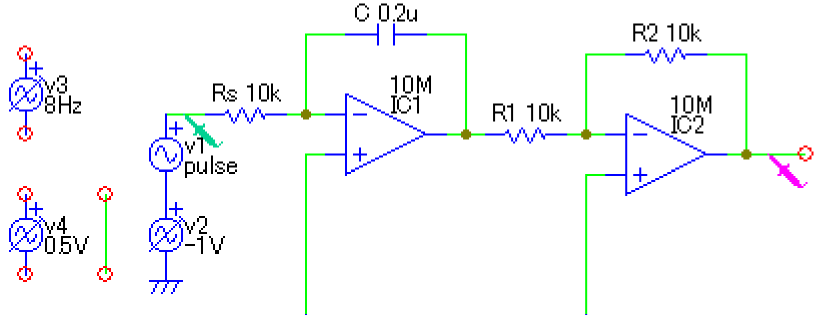
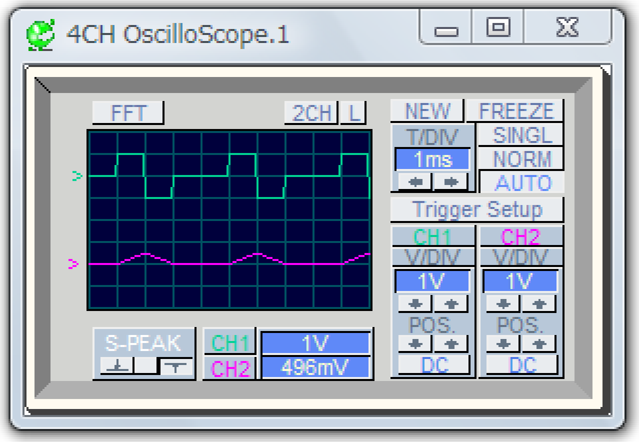


図 3－26　積分回路の等価回路

それでは，図３－27(a)の積分回路において，微分回路のときと同様で入力500[Hz]($t_1=t_2$=1[ms]=0.001[秒])の振幅 ±1[V](E=1)の方形波を加えて，オシロスコープ上の入出力波形を観測してみましょう．このとき，方形波の正の部分では“一定の傾きの右上がりの直線部分の積分値”，負の部分では“右下がりの直線の部分の積分値”が得られ，方形波が積分されていることを目で見て確認することができます(図３－27(b))．このときの理論計算を図３－28に示します．



（a）　実験回路



（b）　入出力波形

図３－27　積分回路のシミュレーション実験

前頁

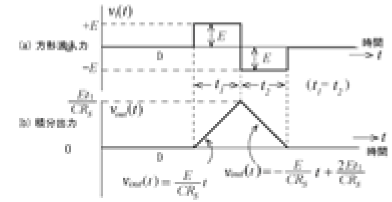


図３－28　方形波入力の積分出力波形（理論計算）

図３－27(a)の積分回路では C=0.2[μF]，R_s=10[kΩ] なので，時定数 τ[秒]は，

$$\tau = CR_s = (0.2\times10^{-6})\times(10\times10^{3}) = 2\times10^{-3}\,[秒]=2[\mathrm{ms}] \qquad (3-45)$$

となります．また，方形波の右上がりの直線部分における $t=0\sim t_0$[ms]の積分値は，

$$\int_0^{0.001t_0} v_1(t)\,dt = \int 1[\mathrm{V}]dt = [t]_{t=0}^{t=0.001t_0} = \frac{t_0}{1000} \qquad (3-46)$$

となり，右下がりの直線部分における $t=0\sim t_0$[ms](t_0≧1[ms])の積分値は，

$$\int_0^{0.001t_0} v_1(t)\,dt = \int_0^{0.001} 1[\mathrm{V}]dt + \int_{0.001}^{0.001t_0} (-1)[\mathrm{V}]dt$$

$$= [t]_{t=0}^{t=0.001} + [-t]_{t=0.001}^{t=0.001t_0} = \frac{2-t_0}{1000} \qquad (3-47)$$

と求められます．よって，t_0 を改めて t [ms] と表すことにして，式（3－44）に代入することにより，出力電圧は，

$$v_{out}(t) = \begin{cases} \dfrac{1}{2\times10^{-3}}\times\dfrac{t}{1000} = 0.5t[\mathrm{V}] & ；右上がりの直線部分 \\ \dfrac{1}{2\times10^{-3}}\times\dfrac{2-t}{1000} = 1-0.5t[\mathrm{V}] & ；右下がりの直線部分 \end{cases} \qquad (3-48)$$

であり，図３－27のオシロスコープ上の出力波形と見比べてみると，理論どおりの実験結果として入力信号の積分値が得られていることを理解できます．

次頁