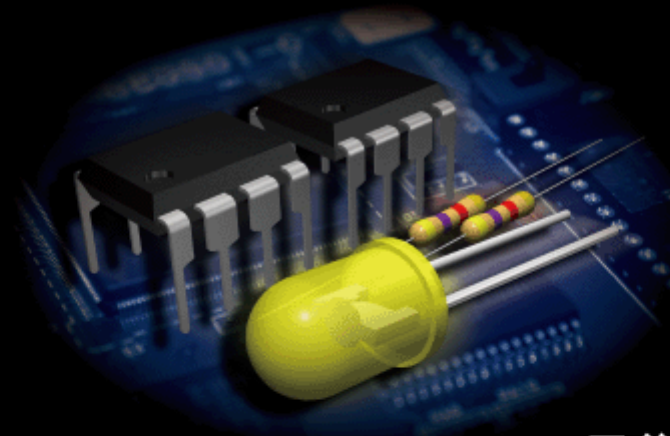




わかる 電子回路入門 の入門 (IV)

～オペアンプ実用編～



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



【楽しく学ぶ】 シリーズ刊行にあたって

【楽しく学ぶ】シリーズは、『回路シミュレータで試してなっとくする』ことにより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おうと、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。 [サイトへ（要登録）](#)

最後に、【楽しく学ぶ】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。



目次

【楽しく学ぶ】シリーズ刊行にあたって 2

目次 4

 導線を巻かなくても、オペアンプでコイルが作れる！？
 回路シミュレータで“試してなっとくする” 6

第1章 “信号を供給する”回路としての使い方 12

 1-1 定電圧電源回路 14

 1-2 基準電圧発生回路 18

 1-3 可変電圧電源回路 22

 1-4 定電流電源回路 24

 1-5 可変電流電源回路 30

 1-6 電流⇒電圧変換回路 34

 1-7 電圧⇒電流変換回路 38

第2章 “信号を非線形演算する”回路としての使い方 40

 2-1 非線形演算回路 42

 2-2 対数変換回路 48

 2-3 逆対数変換回路 (指数変換回路) 52

 2-4 乗算回路, 除算回路 62

 2-5 べき乗回路, 平方根回路 72

第3章 “信号を変調, 復調する”回路としての使い方 78

 3-1 いろいろな変調回路 80

 3-1-1 変調とスペクトル 80

 3-1-2 AM(振幅変調)回路 84

 3-1-3 FM(周波数変調)回路 94

 3-1-4 パルス変調とは 100

 3-1-5 PAM(パルス振幅変調)回路 102

 3-1-6 PWM(パルス幅変調)回路 108

 3-2 いろいろな復調回路 112

 3-2-1 AM復調回路 112

 3-2-2 PLL(位相同期)回路とFM復調回路 116

 3-2-3 パルス復調回路 122

 コラムA [AM波の変調回路] 124

 コラムB [AM波の復調回路] 126

第4章 いろいろなオペアンプ実用回路 130

 4-1 ゼロ(零)レベル検出回路 132

 4-2 オペアンプ1個による正係数積分回路 138

 4-3 抵抗1個で正負の利得を自由に変えられる増幅回路 144

 4-4 マイナス(負)の値を持つ抵抗を実現する回路 150

 4-5 抵抗とコンデンサでコイルを実現する回路
 (シミュレーティッド・インダクタ) 154

 4-6 デジタル⇒アナログ変換器(D/Aコンバータ) 158

 4-7 移相回路(オールパス・フィルタ) 162

 4-8 周波数可変発振回路 166

 4-9 電圧制御形発振回路(VCO回路) 170

操作方法 176

実験室 209

著者紹介 214

参考文献 215



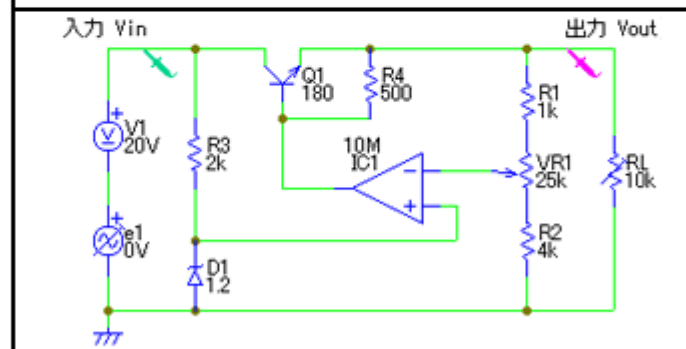
第1章 “信号を供給する” 回路としての使い方

本章では、信号を供給する電源回路を取り上げ、きわめて安定な温度特性や高電圧の出力を得るための工夫についての基礎的な考え方にフォーカスして、オペアンプによる電源について説明します。具体的には、一定の電圧や電流を供給する回路をはじめとして、基準電圧を発生する回路、電流を電圧量に変換する回路、電圧を電流量に変換する回路などを紹介します。

表 1-1 信号を供給する回路

信号を供給する回路	回路名
電源回路	定電圧電源回路
	基準電圧発生回路
	可変電圧電源回路
	定電流電源回路
	可変電流電源回路
変換回路	電流⇒電圧変換回路
	電圧⇒電流変換回路
	抵抗⇒電圧変換回路

回路図





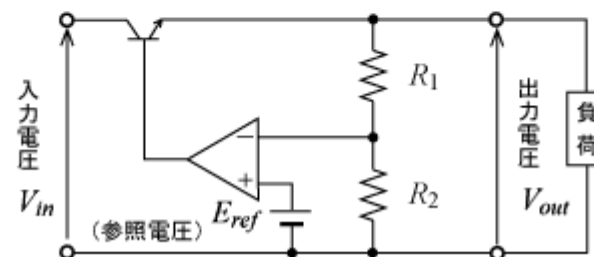
1-2 基準電圧発生回路

図 1-4 (a) の回路は、トランジスタを可変抵抗器として制御回路に用い、入力電圧や負荷の変動に応じて可変抵抗器の抵抗値を自動調整できるようにしたもので、出力電圧を一定に保つことができます。このような基準電圧発生回路の原理は、図 1-4 (b) のブロック図で表せます。つまり、出力電圧 V_{out} と参照電圧 E_{ref} との誤差を検出して増幅し、制御回路で誤差を少なくするように自動修正できるようにしたものです。

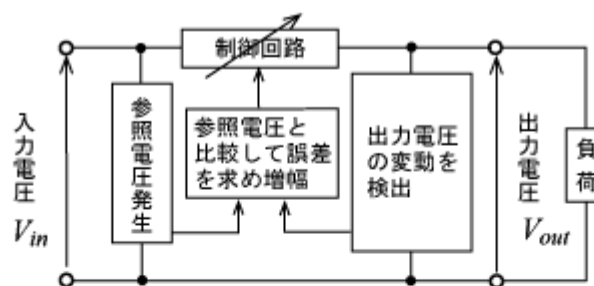
いま、ブロック図で示す回路において誤差を増幅する利得を A とするとき、 A が十分に大きければ（オペアンプはこの条件を満たすことは明らか）、出力電圧の大きさ、 V_{out} は、

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} E_{ref} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) E_{ref} \quad (1-2)$$

と近似できます。このとき、出力電圧の大きさは、参照電圧 E_{ref} または、抵抗 R_1 と R_2 の比を変えることにより、希望の電圧値が得られます。なお、参照電圧 E_{ref} の生成にはツェナー・ダイオードを利用します。



(a) トランジスタ制御形



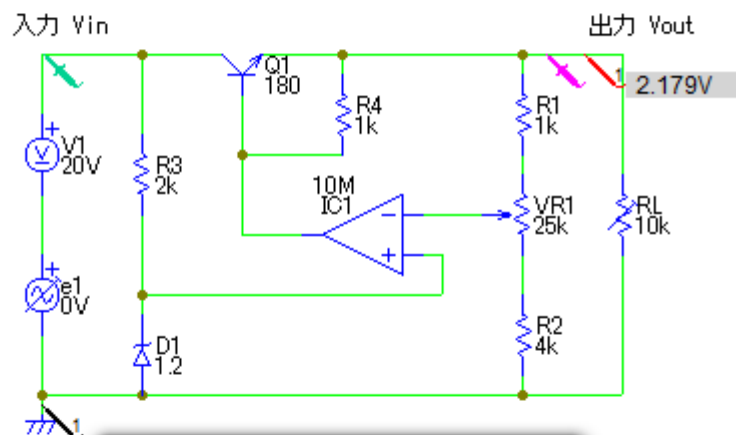
(b) 原理ブロック図

図 1-4 定電圧電源回路とその原理



1-3 可変電圧電源回路

次は、電圧をある範囲内で変えられる“可変電圧電源回路”についてです。基本的な考え方は、図1-5の出力側の抵抗(R_1 , R_2)を電圧調整用の可変抵抗 $VR1$ (0~25[k Ω])の範囲で変えられる)に置き換えることにより実現できます(図1-6)。



入力

出力

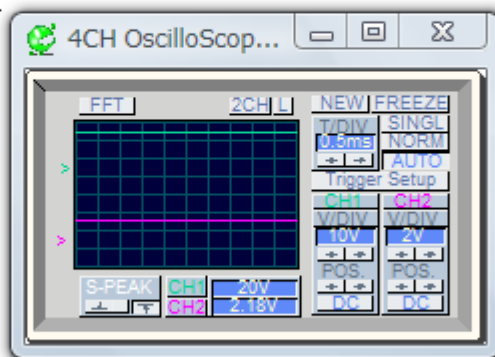


図 1-6 可変電圧電源回路

図1-6より、電圧の可変範囲の最小値 E_{min} と最大値 E_{max} は、

$$E_{min} = \frac{R_1 + R_2 + VR1}{R_2 + VR1} E_Z \quad (E_Z \text{ はツェナー電圧}) \quad (1-4)$$

$$E_{max} = \frac{R_1 + R_2 + VR1}{R_2} E_Z \quad (1-5)$$

と求められます。ここで、図1-6の回路の各素子値を代入して、

$$E_{min} = \frac{1 \times 10^3 + 4 \times 10^3 + 25 \times 10^3}{4 \times 10^3 + 25 \times 10^3} \times 12 \approx 1.24 \text{ [V]} \quad (1-6)$$

$$E_{max} = \frac{1 \times 10^3 + 4 \times 10^3 + 25 \times 10^3}{4 \times 10^3} \times 12 = 9 \text{ [V]} \quad (1-7)$$

であり、電源電圧 V_{out} の可変できる範囲は、ほぼ 1.2[V]~9[V]となります。

それでは、図1-6の実験回路で可変抵抗器 $VR1$ の値(抵抗値の変更方法は [こちら](#))を変えて、出力電圧 V_{out} を読み取り、いろいろな値に変えられることを確かめてください。また、入力電圧 V_{in} (正弦波 e1) および負荷抵抗 RL を変動させて、出力波形にどのような影響を及ぼすのかを調べてみましょう。すると、かなり大きな変動が電源電圧に発生したとしても、出力はほぼ一定電圧であり、定電圧電源としての機能を確認できます。

ところで、抵抗 $R4$ は何のためにあるのだろうと疑問をもたれた方もおられるでしょう。この $R4$ はトランジスタを保護するために入れてあります。ベース・エミッタ間の電圧はトランジスタがこわれない範囲で制限されていて、低電圧しか加えることができません。つまり、大きな電圧がベース-エミッタ間にかかると同時に大きな電流(過電流という)が流れて、回路を破損する恐れがあります。そのために、ベース・エミッタ間に抵抗を挿入し、電流を分散させることで過電流から回路を保護しているのです。このように負荷電流をある許容以下に制限する回路を、“**過電流保護回路**”といます。



1-6 電流 ⇒ 電圧変換回路

電気信号は電圧、電流、周波数というパラメータで表されますが、ある回路のある部分に流れる電流を知るために、それをほかの部分の電圧情報として間接的に知りたいときがあります。たとえば、圧力、風速、温度などの物理量を測定する場合などに使用されるセンサ情報などが挙げられます。センサ情報は一般に電圧、電流、周波数などの電気的データとして得られますから、これらの計測値である電流値を電圧値に、あるいは周波数を電圧値や電流値に変換する必要があります。ここでは、これらの変換へのオペアンプの応用をご紹介します。

たとえば、FETの電流を計測したい場合には、抵抗値が正確にわかっている抵抗 R を帰還抵抗にして、図1-14のようにオペアンプ回路を構成します。すると、出力電圧 V_{out} より、FETに流れる電流 I_{in} は、

$$I_{in} = -\frac{V_{out}}{R} \quad (1-13)$$

と測定できます。つまり、未知のFETに流れる電流 I_{in} が電圧 V_{out} に変換されて測定されているわけで、オペアンプ回路の働きは“電流 ⇒ 電圧変換”であることがわかります。

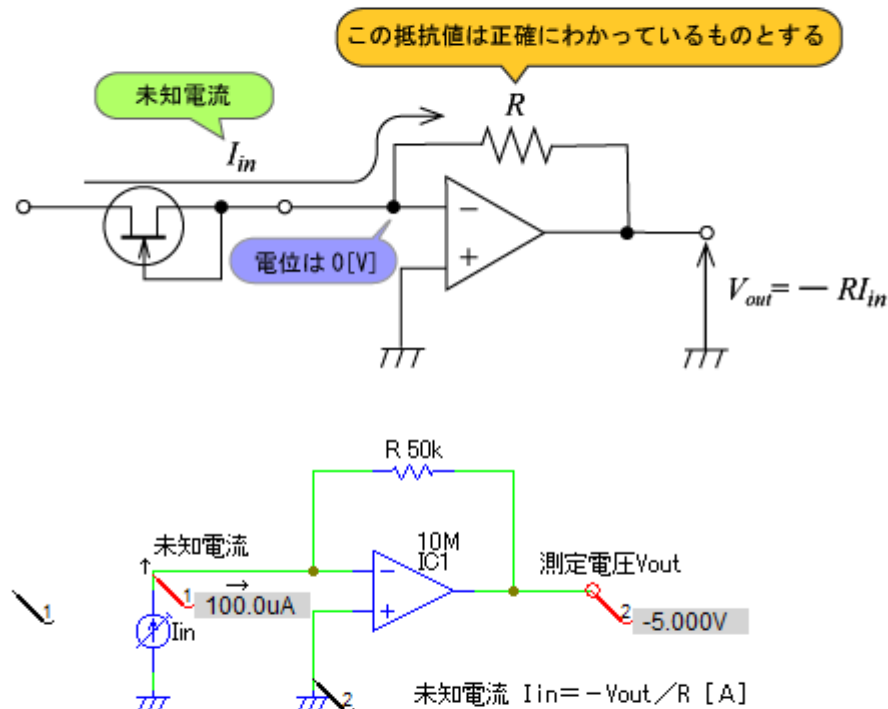


図1-14 電流 ⇒ 電圧変換回路 (I_{in} が小さい場合)



1-7 電圧 ⇒ 電流変換回路

1-4で説明した定電流電源回路を電圧 ⇒ 電流変換回路に利用することができます。一例として、図1-17に回路構成を示してあります。この回路は吐き出し形定電流電源回路を利用した電圧 ⇒ 電流変換回路であり、負荷抵抗 R_L に流れ出す電流 I_{out} が、

$$I_{out} = \frac{R_2 V_{in}}{R_1 R_s} \quad \text{(導出プロセス)} \quad (1-16)$$

と求まります。

それでは、図1-18の電圧 ⇒ 電流変換回路を回路シミュレータで作成して、入力電圧を変えて出力電流の変化を調べてみて下さい。このとき、式(1-16)に

$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L}$ の関係を代入すれば、負荷抵抗の端子電圧 V_{out} [V] から入力電圧

V_{in} [V] が、

$$V_{in} = \frac{R_1 R_s V_{out}}{R_2 R_L} \quad (1-17)$$

と算出できます。なお、図1-18の回路では、各素子値を式(1-16)に代入して、

$$I_{out} = \frac{R_2 V_{in}}{R_1 R_s} = 10 V_{in} \text{ [mA]}$$

となり、電圧量[V]が10倍された電流量[mA]に変換されていることが確認できますね。

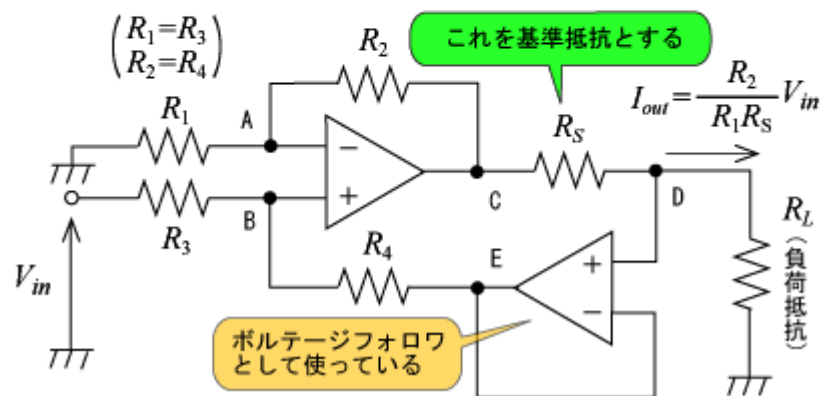


図1-17 電圧 ⇒ 電流変換回路の基本構成

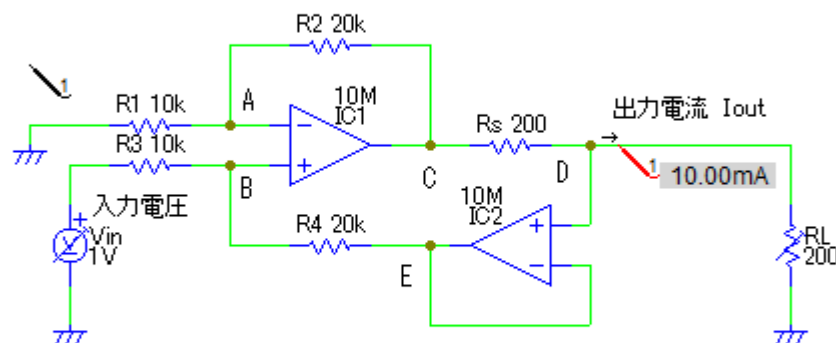


図1-18 電圧 ⇒ 電流変換回路



第2章 “信号を非線形演算する” 回路としての使い方

本章では、ダイオードのもつ非直線性の入出力特性と、オペアンプの特徴をいかして組み合わせると、たとえば対数（ログ）・逆対数（アンチ・ログ）の計算回路を筆頭に、乗算、除算、べき乗、平方根の各回路を実現できます。かなり複雑な回路構成もありますが、基本的な考え方を中心に据えて解説してありますので、回路シミュレータで仮想実験することによって、回路動作についての理解を深めていきましょう。

表 2-1 信号を非線形演算する回路

回路名
対数変換回路
逆対数変換回路
乗算回路
除算回路
乗除算回路
平方根回路
2入力積の平方根回路
べき乗根回路
回路図



2-2 対数変換回路

通常、アンプ(amplifier, 増幅) と言えば出力は入力に比例するものですが、対数変換回路では図 2-3 に示すように、

「10の入力に対しては 1, 100 では 2, 1000 では 3」

となるような対数 (log, ログ) 出力が得られます。図 2-4 にその原理図と等価回路を示します。ダイオードの性質 (電圧、電流ともにゼロ) より、A 点の電位 $v_A = 0[V]$ であることから、

$$i_1 = \frac{v_{in} - v_A}{R} = \frac{v_{in}}{R}, \quad v_B = v_A - V_N = -V_N$$

となります。この抵抗に流れる電流 i_1 はそのままダイオード D に流れ ($I_N = i_1$)、その両端の電圧 V_N が符号反転されて出力電圧 v_{out} になるので、式(2-11)より、

$$v_{out} = -v_B = V_N = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{v_{in}}{RI_S}\right) \quad (2-12)$$

または、常用対数 (底が 10) で表すと、

$$v_{out} = 2.3 \frac{kT}{q} \log_{10}\left(\frac{v_{in}}{RI_S}\right) \quad (2-13)$$

となり、入力電圧を対数変化した値が得られます。

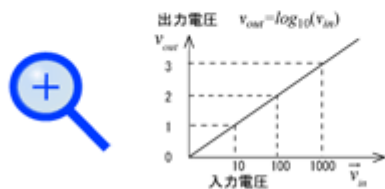
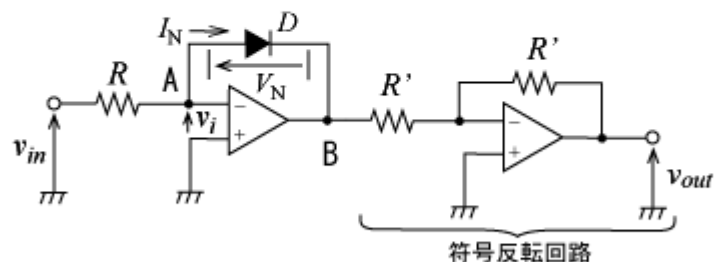
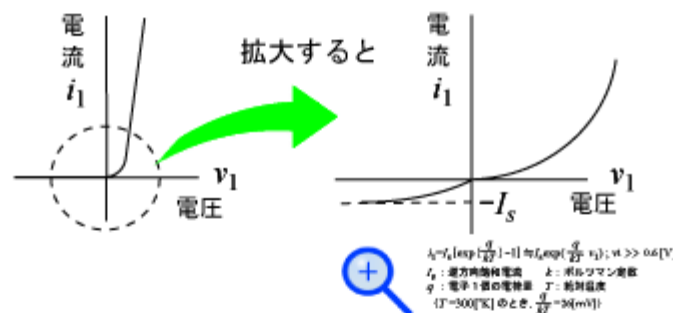


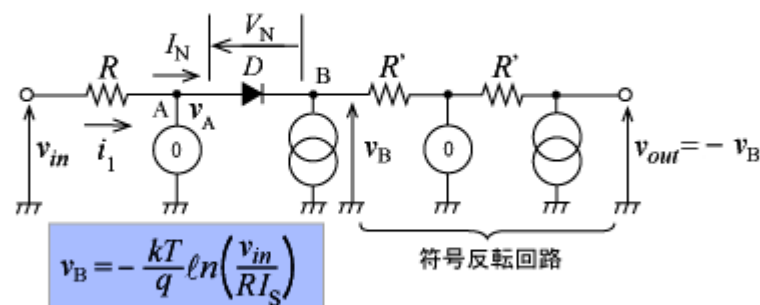
図 2-3 対数変換回路 (ログアンプ) の入出力特性



(a) 基本回路



(b) ダイオードの電圧-電流特性



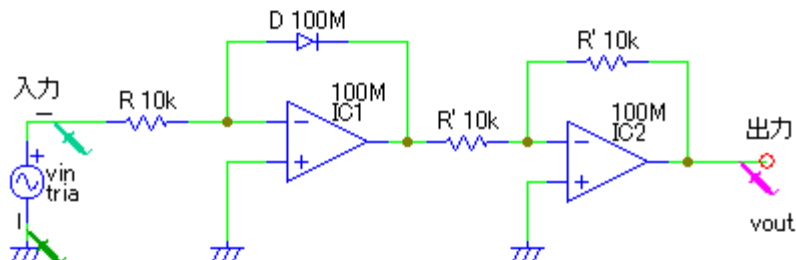
(c) 等価回路

図 2-4 ダイオードによる対数変換回路

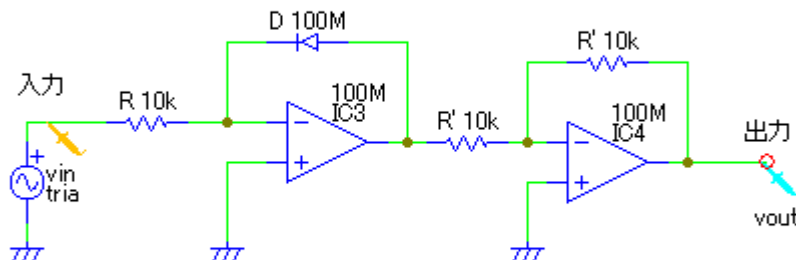


それでは、回路シミュレータを用いて図2-5 (a), (b) の対数変換回路を作成し、三角波を入力してオシロスコープで波形の変化のようすを見て下さい (図2-6)。

ここで、FREEZE ボタンをクリックして表示波形を止めて、入出力電圧の数値を読み解くことにより、入力電圧の対数を採った値にほぼ比例した出力電圧が得られることが確認できます。なお、図2-5 (a) は正の入力信号に対する回路であり、負の場合は同図 (b) のようにダイオードを逆向きにつなぎます。



(a) 入力電圧がプラス (正) の場合



(b) 入力電圧がマイナス (負) の場合

図2-5 対数変換の回路構成例

図2-5(a)
図2-5(b)

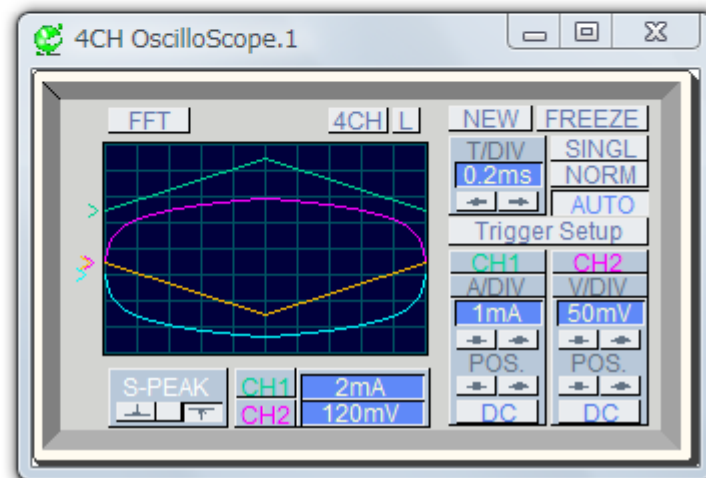


図2-6 対数変換回路の入出力波形

対数変換回路は広い振幅範囲の信号を扱ったり、電圧や電流の値をデシベル [dB] で表現する場合に重宝します。ただし、図2-5の回路のままでは、温度変化などにより出力が大きく変動するため、実際の回路では温度補償するなどの対策が必要となります。実際には、そのほかの演算 (逆対数、乗算、除算など) も同様ではありますが、半導体メーカーから販売されている演算専用ICを用いることが賢明ですし、便利でもあります。



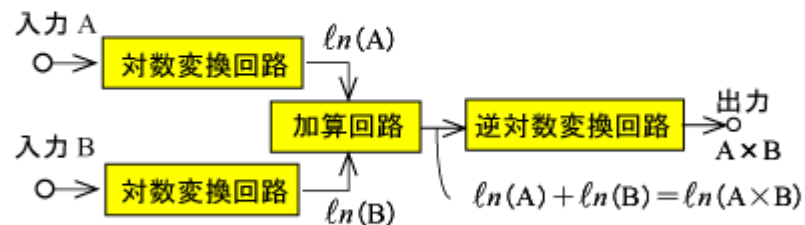
2-4 乗算回路, 除算回路

対数変換回路と逆対数変換回路を組み合わせると, いろいろな演算をアナログ演算回路として実現できます。まず, オペアンプでは入力信号の加算が容易でしたから, 乗算を加算で表す計算式を考えます。それには, 対数の演算を思い出して, 2つの数値 A と B の積が,

$$\ln(A) + \ln(B) = \ln(A \times B) \quad (2-18)$$

のように加算の形で表されることを利用するのです(図2-14)。つまり, オペアンプの入力に対する出力が対数を示す回路(対数変換回路)によって, 式(2-18)における左辺2つの信号, すなわち $\ln(A)$ と $\ln(B)$ を出力とし, さらにその出力信号を加算することで乗算した結果(積)の対数を採ったもの $\ln(A \times B)$ が得られます。

もうおわかりのことでしょうが, 得られた出力 $\ln(A \times B)$ の逆対数をとると, 乗算の演算結果 $(A \times B)$ が得られ, 全体の回路として2つの入力信号の積が出力に現れます。



(加算回路を減算回路に置き換えることにより,
 $\ln(A) - \ln(B) = \ln(A \div B)$
 となり, $A \div B$ を出力する除算回路を実現できます。)

図 2-14 乗算/除算回路の基本原理



この基本原理に基づくアナログ乗算回路の構成を図2-15に示します。

図2-15の乗算回路では、

- ① 2つの入力信号それぞれの対数を計算します (対数変換回路)
- ② 加算をします (加算回路)
- ③ 逆対数を計算します (逆対数変換回路)

の順で2つの信号の積を求めていることになります。実際に2つの信号電圧 x, y を設定して得られる出力電圧を、Excel表に書き込んでください(表2-4)。すると、2つの数値の積がまま得られることがわかります。なお、オペアンプの飽和電圧が10[V]ですから、乗算結果が10を越えるとすべて10と出力されます。つまり、乗算結果が飽和電圧を越えない範囲で正しい出力が得られることになります。

表 2-4 乗算回路における入出力電圧の関係

入力電圧 x [V]	入力電圧 y [V]	出力電圧 [V] (測定値)	乗算結果 xy (理論値)
1	2		2.000
1	3		3.000
1	8		8.000
2	2		4.000
2	4		8.000
3	2		6.000
3	3		9.000
4	3		12.000
4	5		20.000
5	2		10.000

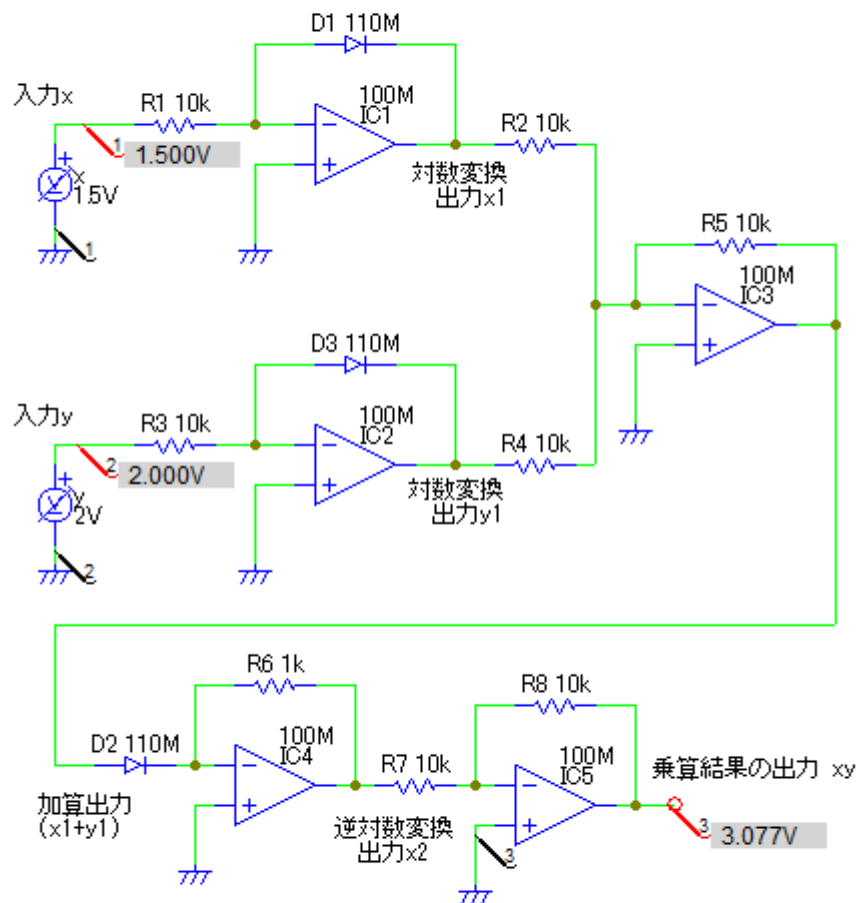


図 2-15 乗算の実用的な回路構成例



第3章 “信号を変調，復調する” 回路としての使い方

本章では、音声や映像などの情報を送る手段として、信号伝送に適する周波数をもった搬送波（キャリア（carrier）波）に情報をのせるため変調法と、情報を含んで送られてくる信号波から情報を分離・抽出する手段としての復調法について解説します。つまり、低周波の情報信号を高周波の電気信号に含ませる“変調”操作と、再びもとの情報信号を取り出す“復調”操作を実現する回路を紹介します。

具体的には、身近なAMラジオの振幅変調，FMラジオの周波数変調，デジタル信号のパルス変調（PAM，PWM）などについて，オペアンプを用いた変復調回路の概要と基本構成を取り上げます。

表 3-1 いろいろな変調方式

変調方式
<u>AM (振幅変調)</u>
<u>FM (周波数変調)</u>
<u>PAM (パルス振幅変調)</u>
<u>PWM (パルス幅変調)</u>
変調出力波形



3-1-2 AM (振幅変調) 回路

もっとも直感的に理解しやすいのが、振幅変調 (AM: Amplitude Modulation) でしょう。なぜなら、入力波形 (音声) と変調された搬送波の振幅が、一対一で対応しているからです。このとき、振幅変調波形の上下頂点を結んだ点線を、包絡線といいます (図 3-3)。図 3-3 ではわかりやすくするために、便宜的に書いているだけで、実際の波形には包絡線はありません。この方式は比較的歴史も古く、一番身近なところでは AM ラジオ放送が、そのほかの代表的なところでは VHF や UHF の航空無線が該当します。AMI は原理上、送信機と受信機の構成がシンプルにできるというメリットがある反面、あまり音質はよくありませんし、ノイズに弱いという欠点があります。

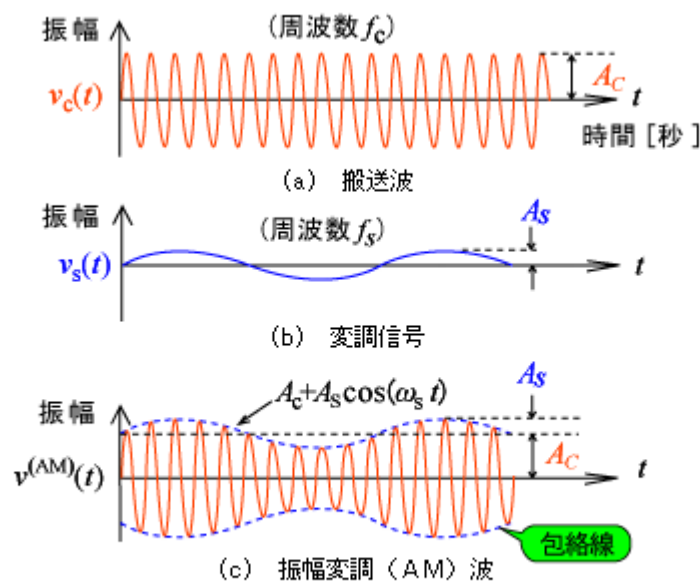


図 3-3 振幅変調 (AM) の波形

さて、図 3-3 (a) に示される一定周波数、一定振幅の搬送波 $v_c(t)$ を、

$$v_c(t) = A_c \cos(\omega_c t + \theta_0) \quad (3-2)$$

A_c : 搬送波の振幅, ω_c [rad/秒]: 搬送波の角周波数 ($\omega_c = 2\pi f_c$),

f_c [Hz]: 搬送波の周波数, θ_0 [rad]: 搬送波の初期位相

で表すことにします。ここで搬送波は、たとえば NHK ラジオ第 1 (関東) であれば 594 [kHz], TBS ラジオなら 954 [kHz] という放送局の周波数とイメージするとわかりやすいでしょう。なお、これ以降一般性を損なうことなく、搬送波の初期位相 θ_0 [rad] = 0 として考えます。

振幅変調では、搬送波 $v_c(t)$ の振幅 A_c を、変調信号 (しばしば略して、単に信号という) $v_s(t)$ に比例して変化させています。変調信号はラジオから流れる音声信号と考えれば理解しやすいでしょう。いま、わかりやすく信号 $v_s(t)$ を図 3-3 (b) に示すように、単一の周波数の余弦波で表示することにして、

$$v_s(t) = A_s \cos(\omega_s t) \quad (3-3)$$

A_s : 変調信号の振幅, ω_s [rad/秒]: 変調信号の角周波数 ($\omega_s = 2\pi f_s$),

f_s [Hz]: 変調信号の周波数

で表すことにします。

それでは、式 (3-2) の搬送波 $v_c(t)$ が、信号 $v_s(t)$ で変調されて作られる振幅変調波 $v^{(AM)}(t)$ は、その瞬時振幅の包絡線が、

$$v^{(AM)}(t) = A_c + A_s \cos(\omega_s t) \quad (3-4)$$

となります (図 3-3 (c))。この振幅変調の様子を数式表現すると、

$$v^{(AM)}(t) = \{A_c + A_s \cos(\omega_s t)\} \cos(\omega_c t) \quad (3-5)$$

であり、

$$v^{(AM)}(t) = A_c \left\{ 1 + \frac{A_s}{A_c} \cos(\omega_s t) \right\} \cos(\omega_c t)$$



と変形されます。ここで、搬送波の振幅 A_c に対する信号の振幅 A_s の割合を m とおくと、

$$v^{(AM)}(t) = A_c \{1 + m \cos(\omega_s t)\} \cos(\omega_c t) ; \quad m = \frac{A_s}{A_c} \quad (3-6)$$

と表されます (図3-4)。この m は変調度とよばれ、正常な振幅変調では、

$$0 < m \leq 1 \quad (3-7)$$

の範囲となります。また、変調度 m が1を超えると ($m > 1$)、変調された波形に大きな歪みが発生します (過変調という)。

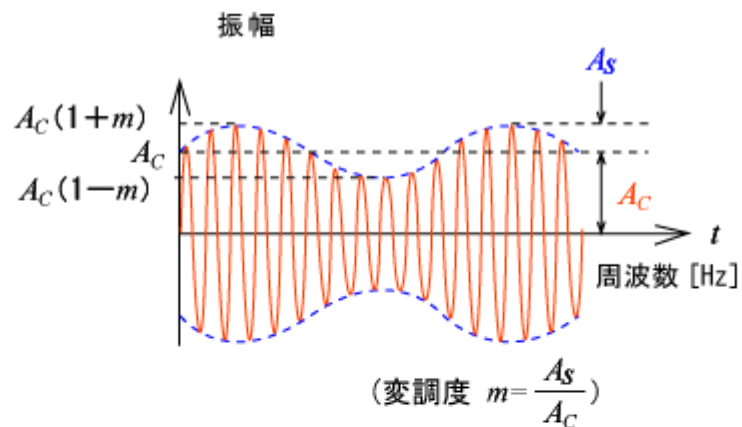


図 3-4 変調度 m とは

それでは、回路シミュレータを用いて振幅変調の様子を調べてみることにしましょう。変調には回路シミュレータで用意されている仮想部品の加算器と乗算器を利用して、図3-5のように回路構成します。オペアンプを用いて乗算器を回路表現できますが、非常に複雑な回路となることから、紙面の関係上割愛させていただき、仮想部品の乗算器で置き換えています (コラムA)。図3-5では、左端の \cos 波交流電源 (変調信号に相当) の周波数は1[kHz] で0.5[V] であり、変調度 m を0.1のステップで変えられるようになっていますので、信号波の電圧をいろいろな数値に設定し、AM波の形状を調べてみましょう。また、もう一つの \cos 波交流電源 (搬送波に相当) の周波数は5[kHz] で1[V] とします。

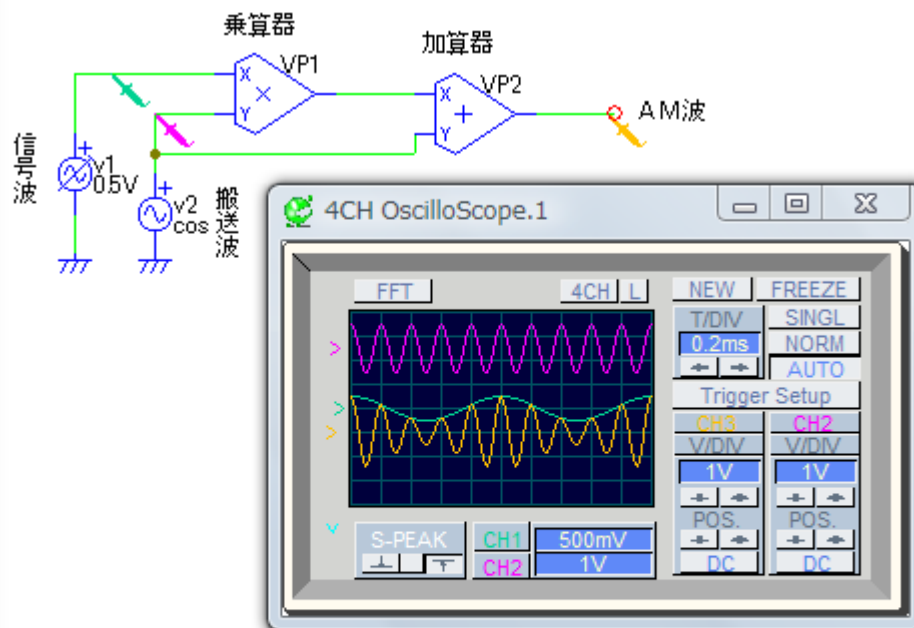


図 3-5 振幅変調回路の構成例



3-1-3 FM (周波数変調) 回路

周波数変調 (FM: Frequency Modulation) ですが、これは入力信号の大きさに応じて搬送波の周波数を変化させる方式です。この変調方式では、振幅は一定なので周波数の変化だけが解れば、もとの信号を取り出せます。ですから、たとえノイズが入ったとしても、リミッタで振幅ノイズ成分は除去できますので、本質的に雑音に強いのが特徴です。また、変調に伴う周波数変化を大きめにとれば、裸のダイナミックレンジ (信号の強弱の幅) と S/N 比 (信号に対する雑音の比率、信号対雑音比という) は改善され、振幅変調では不可能な高音質での信号伝送、良質な通信方式を提供できる大きい特長があります。この特長をいかし、身近な例としては、FM ラジオ放送やテレビジョンの音声放送などに用いられるほか、電話やデータ通信、衛星通信など幅広い応用分野で活用されています。

振幅変調は、変調信号の振幅に比例して搬送波の振幅を可変する変調法でした。これに対して、周波数変調は変調信号の振幅に比例して搬送波の周波数 (Frequency) を可変する変調方式で、周波数変調波 $v^{(FM)}(t)$ は次式で表されます。

$$v^{(FM)}(t) = A_c \cos[\Omega(t)] \quad (3-10)$$

ただし、 $\Omega(t)$ は時刻 t の関数であり、変調信号 $v_s(t)$ 、すなわち、

$$v_s(t) = A_s \cos(\omega_s t) \quad (3-11)$$

により、次のように変化します。

$$\frac{d\Omega(t)}{dt} = \omega_c + \Delta\omega \cos(\omega_s t) \quad (3-12)$$

式 (3-12) はある時刻 t における瞬間の周波数で、これを瞬間周波数といいます。 ω_c は変調信号 $v_s(t)$ がゼロ (0) のときの角周波数であり、中心角周波数とよばれています。また、 $\Delta\omega$ は変調信号の振幅に比例する量で、最大 (角) 周波数偏移とといいます。

また、式 (3-12) の右辺の第2項、すなわち、

$$\Delta\omega \cos(\omega_s t) \quad (3-13)$$

は、搬送波の周波数がその中心角周波数 ω_c から変調信号によって推移される値を示しており、周波数偏移とよべます。

次に、式 (3-12) を積分して、式 (3-10) に代入すると、

$$\begin{aligned} v^{(FM)}(t) &= A_c \cos \left[\omega_c t + \frac{\Delta\omega}{\omega_s} \sin(\omega_s t) \right] \\ &= A_c \cos[\omega_c t + k \sin(\omega_s t)] \end{aligned} \quad (3-14)$$

となり、

$$k = \frac{\Delta\omega}{\omega_s} \quad (3-15)$$

を変調指数とよんでいます。



図 3-11 に周波数変調波の波形を示します。図 3-11 を見ると、変調信号の振幅が正に大きいとき“密な（周波数が高い）波形”，負に大きいときは“疎な（周波数が低い）波形”になった疎密波となり、振幅は変化しない波形が周波数変調波として得られることがわかります。また、変調信号の振幅と周波数偏移の関係は図 3-12 のようになります。

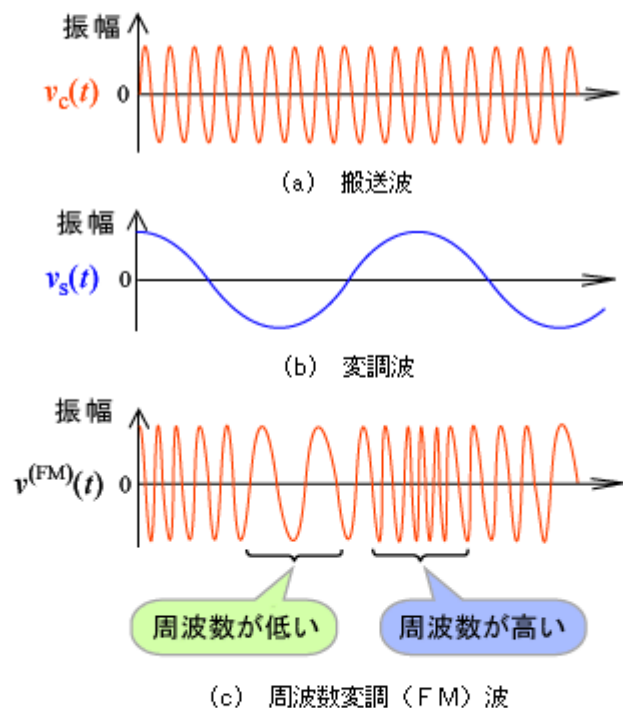


図 3-11 周波数変調 (FM) の波形

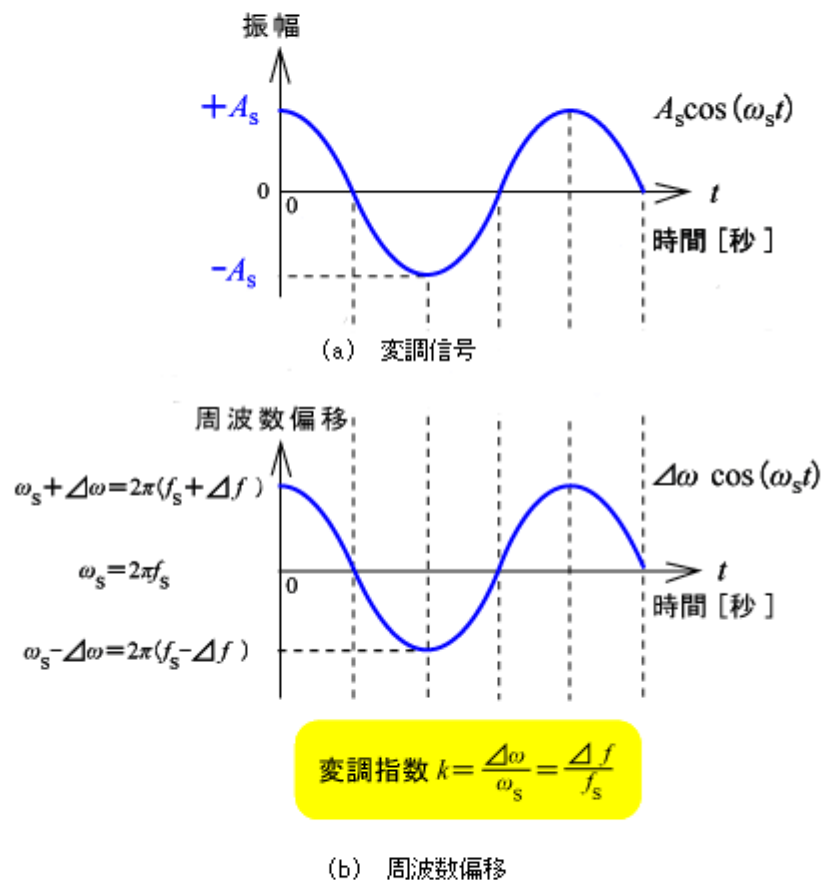


図 3-12 FM波の周波数偏移と変調信号の関係



それでは、回路シミュレータを用いて、図3-13に示すオペアンプを用いたVCO (Voltage Controlled Oscillator; 電圧制御発振) 回路を作成して、スイッチ投入後の周波数変調の様子を擬似体験してみましょう (なお、VCO回路の詳細は4-9を参照)。ただし、VCO回路は方形波出力であり、実際のFMラジオで使われる変調方式を忠実に再現しているわけではないですから、その点は注意して下さい。あくまでも、電圧の大きさによって周波数が変わること、すなわち周波数変調の原理を理解してもらうために採り上げたものですから。

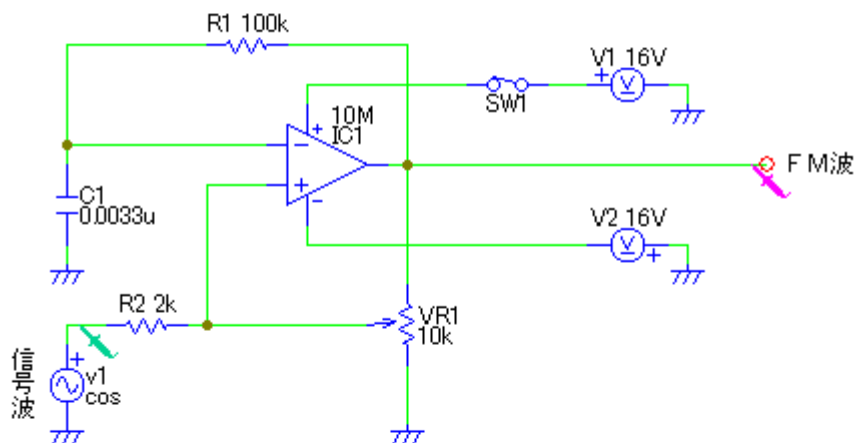


図3-13 電圧制御発振 (VCO) 回路の構成例

式(3-11)の変調信号 $A_s \cos(\omega_s t)$ として、信号源の周波数を 10 [V] で 100 [Hz] の \cos 波に設定し、出力信号波形 (FM変調波のつもり) を観測してみてください (図3-14)。図3-14より、出力パルスの時間間隔が電圧が大きいときには狭まり (高い周波数)、逆に小さいときには広がる (低い周波数) ことがわかります。また、可変抵抗値 VR1 を変えて出力信号の周波数を変えたり、信号種類をパルス波、三角波、ランプ波などに設定して、出力信号の周波数が信号電圧によって変化する様子、すなわち周波数変調の感じをつかみとって下さい。

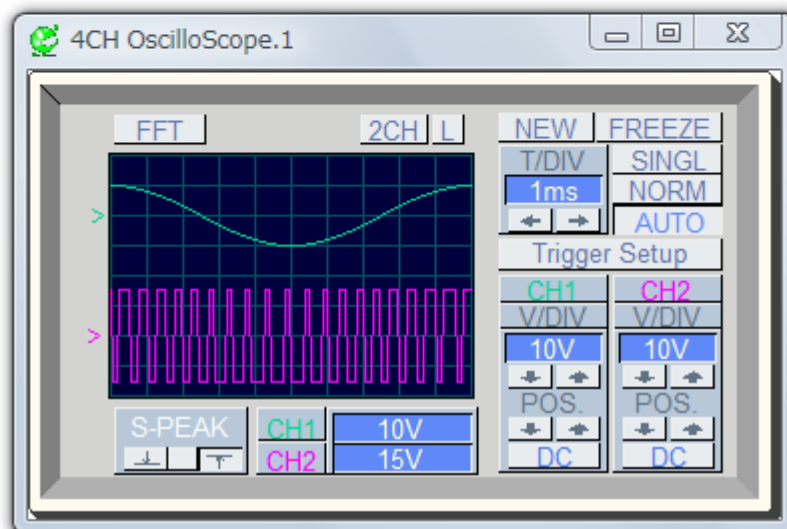


図3-14 VCO回路を用いた周波数変調による信号波形



第4章 いろいろなオペアンプ実用回路

本章では、オペアンプだからこそ、楽に作れる回路、便利な回路、実用性の高い回路を中心に解説します。たとえば、フィルタ回路、発振回路、増幅回路、負（マイナス）の値を有する抵抗、銅線を巻かないコイルなどについて、なるべく簡単なものを提示することにより、オペアンプのもつ有用性を理解してもらいます。同時に、回路シミュレータでいろいろな応用回路を作成して仮想実験することにより、時間特性（オシロスコープ）や周波数特性（周波数アナライザ）を目で見ながら、回路動作についての理解を深めていきましょう。

表 4-1 いろいろなオペアンプの実用回路

回路名	
ゼロレベル検出回路	正係数積分回路
正負利得変換回路	負性抵抗回路
D/Aコンバータ	移相回路
抵抗とコンデンサでコイルを実現する回路	
周波数可変発振回路	
電圧制御形発振 (VCO) 回路	
出力波形	
回路図	



4-3 抵抗1個で正負の利得を自由に変えられる増幅回路

まず反転増幅器と非反転増幅器は、図4-12に示すように、電圧利得は2つの抵抗の比率によって、

$$\text{反転増幅器の電圧利得} : G_1 = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4-19)$$

$$\text{非反転増幅器の電圧利得} : G_2 = \frac{v_2}{v_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (4-20)$$

で与えられ、実現可能な電圧利得の範囲は、

$$\text{反転増幅器} : G_1 < 0 \quad (\text{負の値}) \quad (4-21)$$

$$\text{非反転増幅器} : G_2 \geq 1 \quad (\text{正の値}) \quad (4-22)$$

となります。このとき、利得を可変するには帰還抵抗 R_2 に可変抵抗 \tilde{R} を直列に接続すればよいことに気づきます(図4-13)。それでは、回路シミュレータで図4-13(a)、(b)の回路を作成し、可変抵抗 \tilde{R} に対する出力電圧の変化の様子を調べてみましょう(図4-14)。シミュレーション結果に基づき、可変できる電圧利得の範囲は、反転増幅器： $-11 \leq G_1 \leq -1$ 、非反転増幅器： $2 \leq G_2 \leq 12$ となることがわかります。

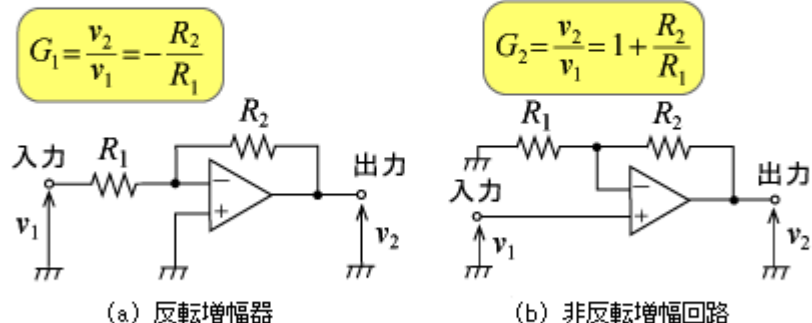


図4-12 オペアンプ増幅の基本回路

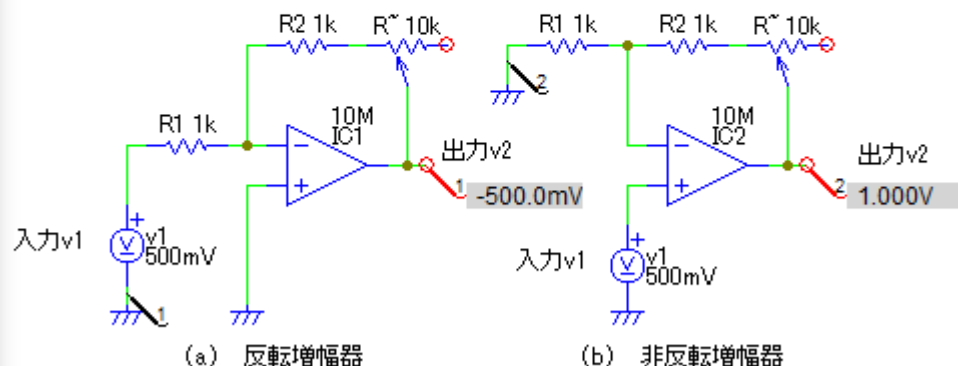


図4-13 オペアンプ増幅の基本回路のシミュレーション実験

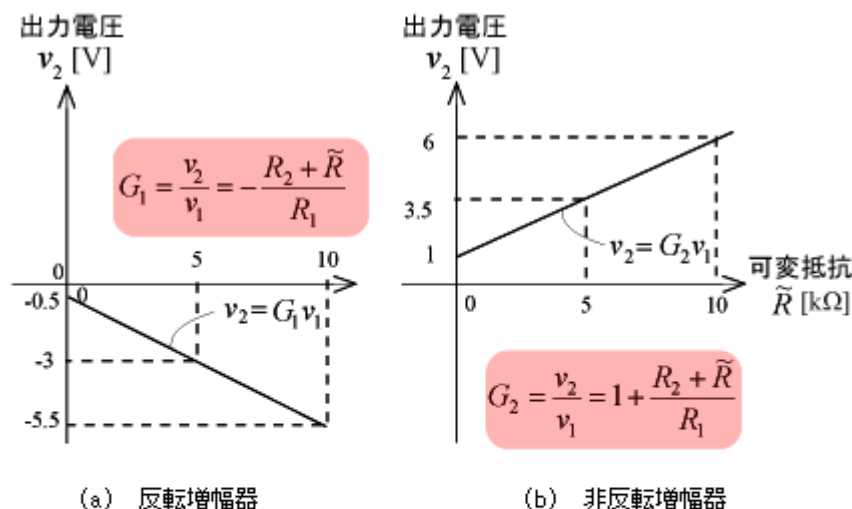


図4-14 可変抵抗 \tilde{R} に対する出力電圧 (入力電圧 v_1 は 0.5[V] で一定)



ところで、図4-15のように回路構成すると、図4-12(a)と(b)をひとつにまとめることができ、- (負) から + (正) へと連続的に電圧利得を可変できる増幅回路を実現することができます。この可変利得増幅回路の電圧利得は、

$$G = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_3 \tilde{R}}{R_1(R_4 + \tilde{R})} + \frac{R_4(R_2 + R_3)}{R_2(R_4 + \tilde{R})} \quad (4-23)$$

で与えられます (導出プロセスは [こちら](#))。一例として、

$R_1=2.5[\text{k}\Omega]$, $R_2=10[\text{k}\Omega]$, $R_3=100[\text{k}\Omega]$, $R_4=150[\text{k}\Omega]$, $\tilde{R}=0\sim 100[\text{k}\Omega]$ とするとき、可変抵抗 \tilde{R} に対する電圧利得の変化の様子を回路シミュレータで調べておきましょう。(図4-16、表4-2に出力電圧を書き込んでください)。

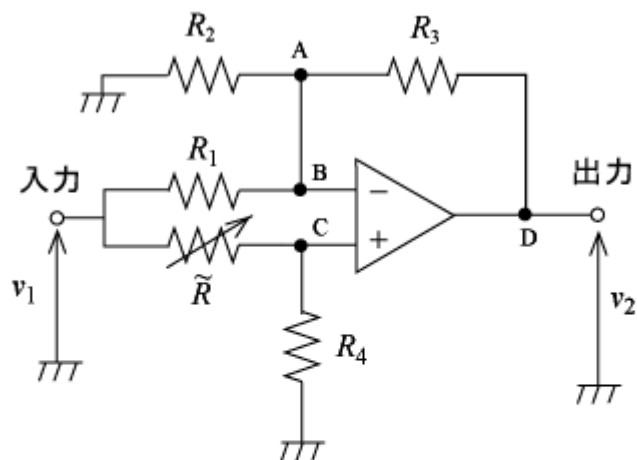


図4-15 可変利得増幅回路の構成例

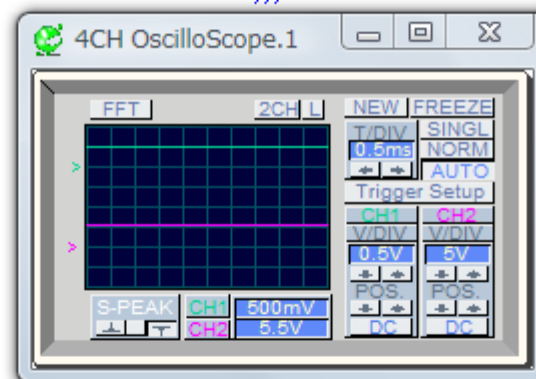
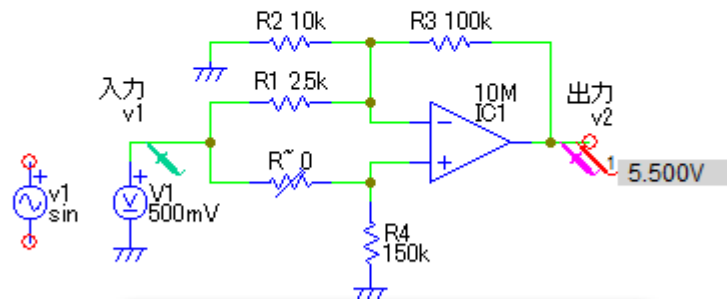


図4-16 可変利得増幅回路

表4-2 可変利得増幅回路の入出力電圧の関係

可変抵抗値R[kΩ]	出力電圧v2[V]	電圧利得G=v2/v1	電圧利得(理論値)
0	0.00	0.00	11.00
10	0.00	0.00	7.81
20	0.00	0.00	5.00
30	0.00	0.00	2.50
40	0.00	0.00	0.26
50	0.00	0.00	-1.75
60	0.00	0.00	-3.57
70	0.00	0.00	-5.23
80	0.00	0.00	-8.74
90	0.00	0.00	-8.13
100	0.00	0.00	-9.40

(入力電圧v1=0.5[V]で一定)

