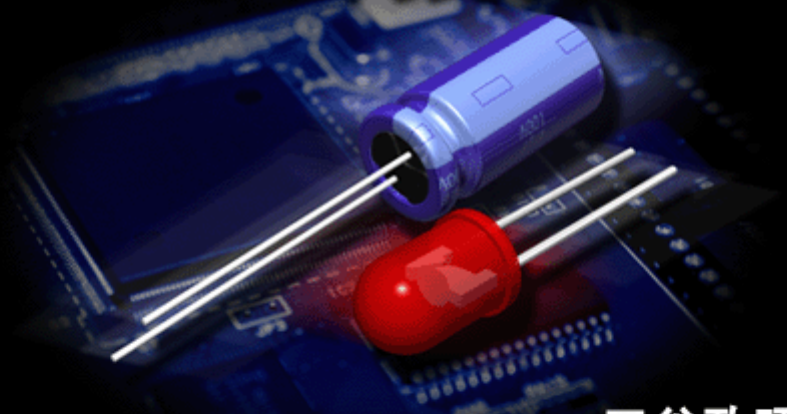




# わかる 電子回路入門 の入門（I）

～ダイオード・トランジスタ編～



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してきました。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、専門書を読んでもはみたが難しくてもとっつきにくい、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
電子回路を理解するのに必要な「暗号学」 ～回路シミュレータで“試してなっとくする”～	8
<b>第1章 電気・電子回路の楽しさ、おもしろさを知ろう!</b>	12
体感回路1 スwitching回路で赤い光を点滅させてみよう	13
体感回路2 正弦波の形状を変えて出力してみよう (飛び出すオシロスコープ)	14
■回路ソフトの使いこなし術 1-1■ 回路素子の値を変えるには	15
体感回路3 オームの法則を実験で確かめてみよう	16
体感回路4 雑音を取り除いてみよう	18
ナットクの例題 1.1 コンデンサと抵抗を入れ換えるとどうなるの?	20
体感回路5 周波数に対する変化のようすを観測してみよう (飛び出すスペクトル・アナライザ)	22
<b>第2章 半導体とpn接合がもたらす不思議な世界</b>	24
2-1 電気の正体	24
2-2 回路素子	26
2-3 半導体とは (受動素子と能動素子)	26
2-4 真性半導体	28
2-5 n形とp形の半導体	30
2-6 キャリアは電流の担い手	33

2-7 オーミック接触とpn接合	34
2-8 pn接合は電流を一方向にしか流さない	38
2-9 pn接合ダイオード (順方向, 逆方向)	40
2-10 ツェナー効果とツェナーダイオード	42
2-11 可変容量ダイオード	44
<b>第3章 ダイオードによる波形変換回路</b>	46
3-1 半波整流回路	46
おとくだね実験 3-1 ダイオードを理想化すると	48
ナットクするためのチェック問題 3-1 負の部分のみを取り出してみよう	50
3-2 全波整流回路	52
3-3 平滑回路	54
おとくだね実験 3-2 入力2倍, 3倍, …の直流にするには	56
3-4 クリップ (波形の先端部分を切り取る)	58
3-5 リミッタ (波形の中心部分を取り出す)	60
3-6 クランプ (波形の基準レベルを変える)	62
ナットクするためのチェック問題 3-2 正弦波入力に直流が加わると	64
おとくだね実験 3-3 定電圧回路	66
<b>第4章 トランジスタ, FET って, どんなもの?</b>	68
4-1 トランジスタの基本構造	68
4-2 トランジスタの基本動作	72
4-3 トランジスタの静特性	76
4-4 トランジスタの電氣的動作の数式表現	78



4-5 トランジスタの最大定格 . . . . . 80

4-6 接合形 FET の構造 . . . . . 82

4-7 接合形 FET の基本動作 . . . . . 84

4-8 接合形 FET の静特性 . . . . . 86

4-9 MOS FET の構造 . . . . . 88

4-10 MOS FET の動作原理 . . . . . 90

4-11 MOS FET の静特性 . . . . . 94

4-12 CMOS 回路 . . . . . 97

第5章 トランジスタによる信号増幅にチャレンジしてみよう！ . . . . . 100

5-1 増幅の基礎 . . . . . 101

5-2 トランジスタ増幅回路における各部の電圧 . . . . . 104

5-3 トランジスタによる増幅とは . . . . . 108

5-4 交流信号に直流を重畳するには (バイアス) . . . . . 112

5-5 交流入力に対する増幅回路の基礎 . . . . . 114

5-6 交流信号のみに対する増幅の等価回路 . . . . . 116

5-7 交流信号に対する増幅の計算 . . . . . 118

第6章 FETによる信号増幅にチャレンジしてみよう！ . . . . . 120

6-1 バイアスにおける交流と直流 . . . . . 120

6-2 交流解析と直流解析 . . . . . 122

6-3 バイアス時の入力と出力 . . . . . 124

6-4 適切なバイアスとは . . . . . 127

6-5 FET を用いた増幅回路 . . . . . 130

6-6 交流等価回路を得るためのキーポイント . . . . . 132

6-7 信号増幅回路の電圧利得 . . . . . 135

付録 . . . . . 137

    操作方法 . . . . . 138

実験室 . . . . . 159

索引 . . . . . 164



## 第1章

### 電気・電子回路の楽しさ、おもしろさを知ろう！

電気信号の通り道を寄せ集めた電気・電子回路には、導線のほかに抵抗、コンデンサ、コイル、トランジスタなどの回路素子が使われます。これらの素子は、加えられた電圧に対して電流の大きさを適当な値に制限したり、電圧や電流のタイミングを調整したり、……と多種多様な働きをもっています。

まずは、電気・電子回路の働きを目で見て、回路のもつ楽しさやおもしろさを実感してもらいながら、本書のために株式会社マイクロネットが開発した回路シミュレータソフト『CircuitViewer（サーキット・ビューア）』のもつすばらしい能力の一端を垣間見ていただきます。

#### 体感回路1 スイッチング回路で赤い光を点滅させてみよう

図1-1のスイッチング回路で、スイッチSW1とSW2を入れたり（ON）、切ったり（OFF）してみましょう【スイッチの操作方法】。カーソル（マウス・ポインタ）をスイッチ素子の真上に移動して左クリックすると、どうなったでしょうか？

SW1とSW2の2つのスイッチが同時にONしたときのみ、LED（Light Emitting Diode；発光ダイオード）が赤い色に変化することを目で見て確認できますね。

図1-1は、論理素子の一つであるAND（論理積）の機能を調べるときのものですが、みなさんにとって初めて回路シミュレータを使用された感想はいかがでしょう（おそらく、なかなかやるもんだね、と納得されたのでは…）。

こんなふうに実際にスイッチを切り替えてのLEDの点滅（点灯 / 消灯）のようすから、論理回路の機能が調べられるという仮想実験ができるんですから、あたかも、実際の回路にさわってスイッチを動かしているような感じさえもしてきます。

次に、AND論理素子をU2のOR（論理和）とU3のXOR（eXclusive OR、排他的論理和）を選択して取り替えてみましょう【ラジベンの操作方法】。このとき、

スイッチ → ON（論理値の‘1’）、OFF（‘0’）

LED → 点灯（論理値の‘1’）、消灯（‘0’）

と対応づけて、スイッチのON/OFFの組み合わせに対応するLEDの点灯 / 消灯の関係をじっくりと調べて、Excel表（専門的には、真理値表という）を埋めて下さい。

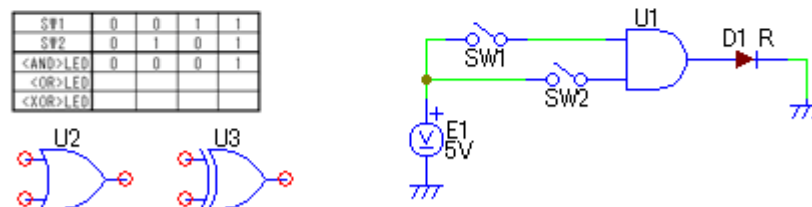


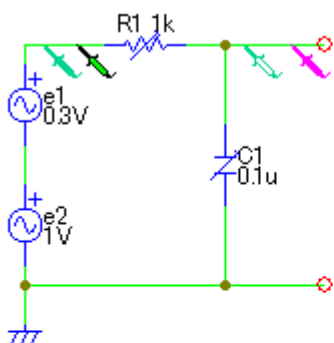
図1-1 スイッチング（論理積（AND））回路



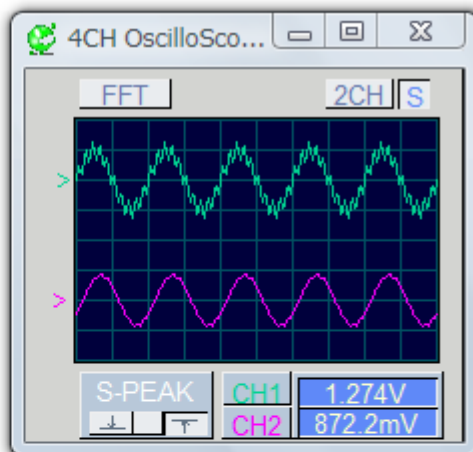
### 体感回路4 雑音を取り除いてみよう

図1-6で、入出力波形をオシロスコープで観測してみましょう。ギザギザした変動部分(雑音に相当)を含む入力信号が、滑らかな形状になって低い周波数成分の信号だけを出力していることがわかります。つまり、ギザギザの雑音がなくなっているわけで、コンデンサと抵抗の回路で雑音を取り除く働きを実現しているのです。

「へえー、コンデンサと抵抗で雑音が除去されるんだ、不思議だな」と思えますね。実は、図1-6(a)はローパス(低域通過)フィルタと呼ばれています。



(a) 回路構成



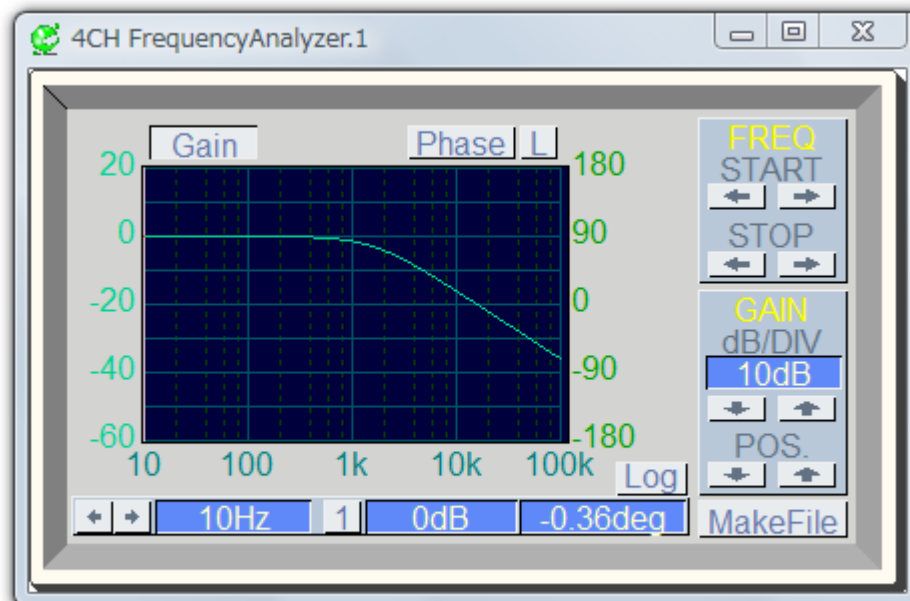
(b) 入出力波形

図1-6 ローパスフィルタの例(RC回路)

ここで、コンデンサと抵抗の大きさをいろいろに変えて、雑音の除去性能に違いがあることを実感してみましょう。初めに、コンデンサ容量(キャパシタンス)を一定にして、抵抗値を変えてみるとどうでしょう。出力波形の大きさは小さくなりますが、

抵抗値を大きく(小さく)する ⇒ 雑音が小さく(大きく)なる  
また、抵抗値を一定にして、コンデンサ容量を変えると、

キャパシタンスを大きく(小さく)する ⇒ 雑音が小さく(大きく)なる  
となりますね。こうした違いは、回路のシャ断周波数(カットオフ周波数ともいう)の違いに依るものです。シャ断周波数は、通過域(信号を通しやすい周波数帯域で、パスバンド(passband)ともいう)と阻止域(信号を通しにくい周波数帯域で、ストップバンド(stopband)ともいう)の境目を表わします。







## 第2章 半導体とpn接合がもたらす不思議な世界

まずは、「半導体の半分が導体って？」という疑問を解きほぐすことから始めましょう。それには「電流」そのものをもう少し詳しく知る必要があります。なぜなら「電流」そのものの理解を深めることにより、私たちの生活に根づいている半導体エレクトロニクスのおもしろさがごくごく自然に読み取れるようになるのですから。

### 2-1 電気の正体

一般に、身近にある電気コードに使われる（たとえば銅線）などの金属は、電流が流れやすいことが知られ、**抵抗値**が小さいという言い方をします。

金属に限らず、すべての物質は原子核（プラスの**電荷**をもつ）とその周りで動きまわる電子（マイナスの電荷をもつ）からできている、というようなことを中学校の理科で習った記憶がおりかと思えます。そして金属原子では、一部の電子が原子から離れて動いているということが起きています（図2-1）。このように離れて自由に動き回る電子は**自由電子**（あるいは、単に**電子**）と呼ばれ、電気の運び屋（キャリア）に変身して“電流の素”になっています。

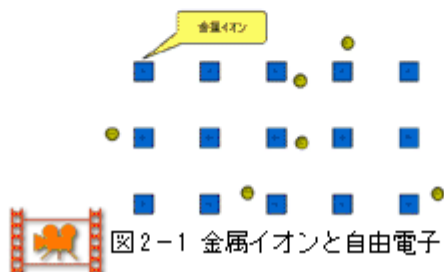


図2-1 金属イオンと自由電子

次に、このような特徴を有する金属の両端に、電池をつないでスイッチを入れてみましょう（図2-2）。すると、電圧  $E$  が金属に加わり、電気抵抗  $R$  に応じて電流  $I$  が流れる、という現象が起こります（体感回路3（オームの法則）参照）。

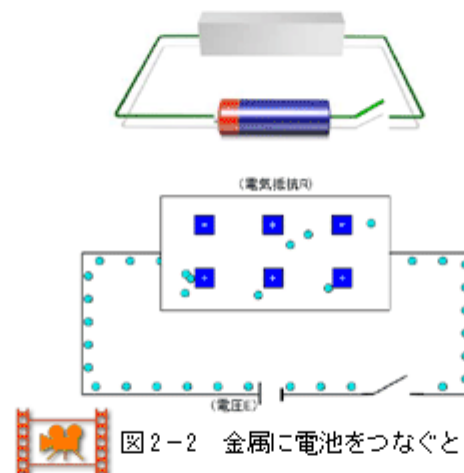


図2-2 金属に電池をつなぐと

さて、電池をつなぐと電圧が加わるわけですが、少し専門的な言い方をすると、**電界**が加わった、ということになります。電界というのは、中にある自由電子などの電荷をもつものに電気的な力（**クーロン力**）を働かすことになります。

つまり電池をつないだことで、金属の中にあるプラスの電荷をもつ原子核と自由電子にクーロン力という力が働きますが、プラスの原子核は自由電子の数千倍ぐらい重いので、ほとんど動きません。他方、マイナスの電荷をもつ軽い自由電子はクーロン力で動き出し、電池のプラス極に向かってどんどん加速され、引きつけられて動くことになります。このプラス極に向かって移動する自由電子が電流そのものになるのです。なお、電流の向きは「自由電子の移動方向とは逆向き」とであると決められています。



### 2-5 n形とp形の半導体

話は、ここからが本論です。実は、せっかく純度を高めた半導体の中に、わずかな不純物をまぜて“**不純物半導体**”を作って、半導体素子のもつ電氣的に不思議な世界を実現していくのです。このとき、加える不純物の違いにより、n形（マイナスの電荷が過剰）とp形（プラスの電荷が過剰）に分けられる2種類の半導体ができることとなります。

#### (n形半導体)

n形の不純物半導体を作る概念は、図2-5に示すとおりで、熱を加えて溶かしたシリコンの液体に不純物を加えます。

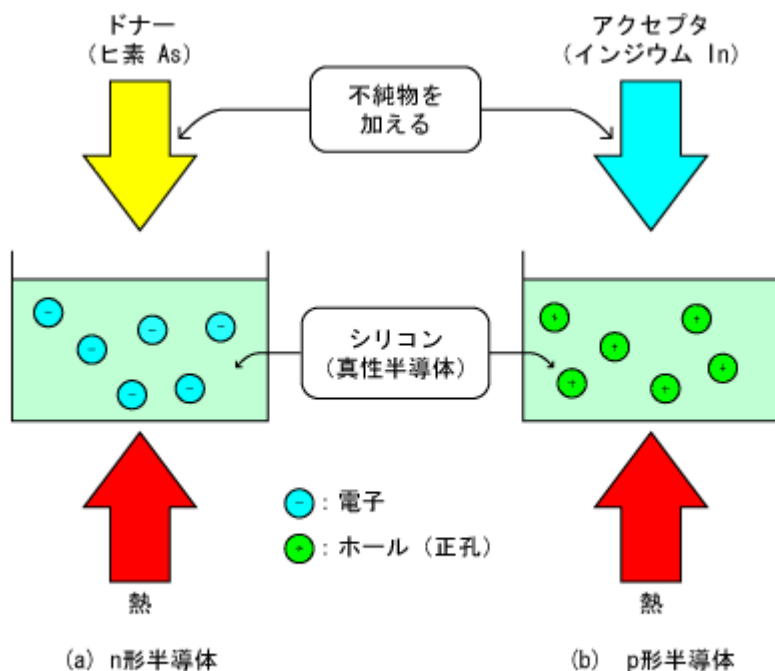


図2-5 真性半導体は不純物で変身する

4本の手をもつシリコンに、結合の手が5本の第V族（5個の価電子をもつ）のリン（P）やヒ素（As）などのドナーを少し加えると、1本は結合する相手が見つかりません（図2-6）。そのため、余った手の中にある1個の価電子が自由電子となって、結晶中をふらふらして自由に動けるわけで、マイナス（負；negative）の電荷を運ぶという意味から**キャリア**（carrier）と呼んでいます。

このような自由電子が多いタイプの不純物半導体は、**n形半導体**と呼ばれます。

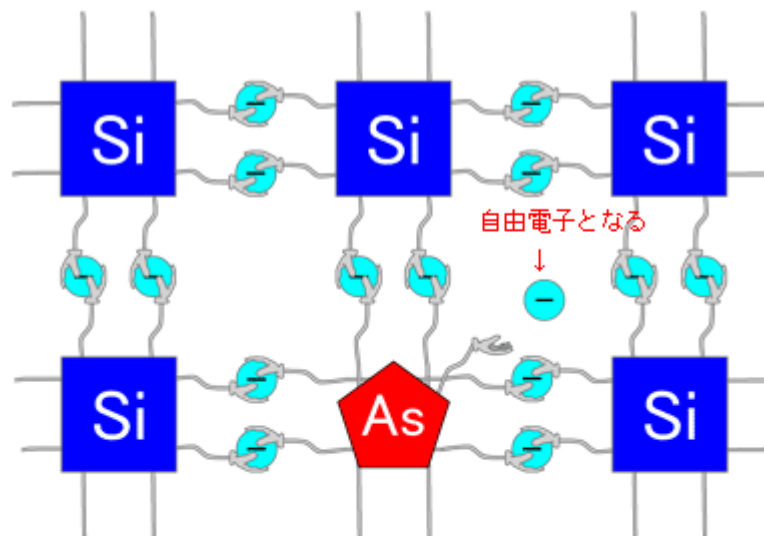


図2-6 n形半導体と過剰電子





（p形半導体）

また、第Ⅴ族ではなく、第Ⅲ族（3個の価電子をもつ）のホウ素（B）やインジウム（In）といったアクセプタを少し加えると、結合の手が3本しかないので、結合の手が1本足りなくなります。結合するためには、隣の共有結合のところから無理やり電子を引っばってきて、「足りないところ（電子の抜け殻）」にはめ込んでしまうこととなります（図2-7）。そのため、電子が抜けたところは新しく結合の手が足りない状態になり、この「足りないところ」はまた別の電子を無理にでももってこようとして、このような動きがずうっと続いて、次々に「足りないところ」が移動していくこととなります（図2-8）。

「足りないところ」は**正孔**、あるいは**ホール**とよばれ、電子の抜け殻ですから電気的にはプラス（正；positive）の電荷とみなせます。このようなホールが多いタイプの不純物半導体は、**p形半導体**と呼ばれます。なお、ホールはプラスの電荷をもって動き回るので、ホールの動く方向と同じ向きの電流が流れます。

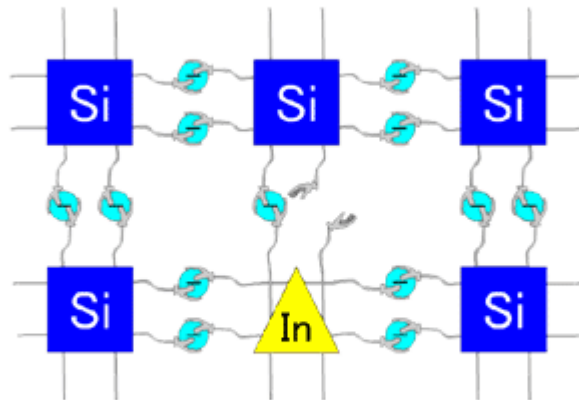


図2-7 p形半導体とホール（正孔）

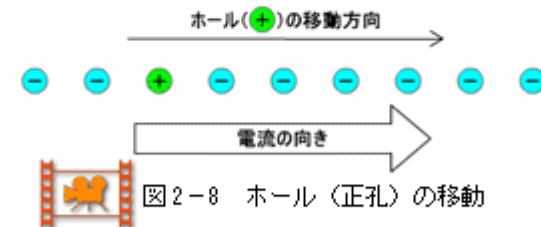


図2-8 ホール（正孔）の移動

2-6 キャリアは電流の担い手

半導体中で電流の素になるものは、電子とホール（電子の抜けたところ）の2つでした。そして、

- ・電子が動くこと
- ・ホールが動くこと

によって、電流が流れることとなります（図2-9）。このように電流を流す担い手をキャリアといい、

- ・n形半導体では「電子」
- ・p形半導体では「ホール」

となっています。たとえば、n形半導体での電流を流す主役は「電子」で、数多く存在しているので**多数キャリア**と言います。また、ごく微量ですがキャリアとして「ホール」も存在しており、数が少ないので**少数キャリア**と呼ばれます。

なお、p形半導体ではn形半導体のキャリアとは逆の関係になります。

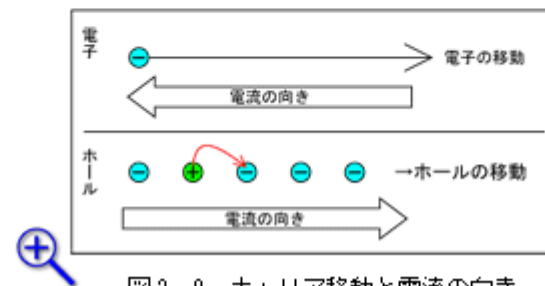


図2-9 キャリア移動と電流の向き



## 第3章 ダイオードによる波形変換回路

第2章で紹介した“一方通行”特性の「ダイオード」を用いて、いろいろな波形変換回路を作り、ダイオードの機能を理解してもらうことにしましょう。いくつかの例題も自力で必ず解いて下さい（手抜きは禁物ですよ）。

波形変換とは、入力波形の一部をあるレベルで切り取ったり、波形の基準電圧を変えたり、交流波形を直流に変換したり、ひずんだ波形をきれいな波形に整えたりするなど処理のことをいいます。

### 3-1 半波整流回路

“半波整流回路”は、信号波形の正の部分のみ、または負の部分のみを取り出したいときに用いられます。さっそくダイオードと抵抗の直列回路（図3-1）を動かして、オシロスコープで波形を観測してみましょう。オシロスコープ上の入出力波形を見ると、正弦波信号の正の部分のみを取り出す働きをしていることがわかりますが、出力信号の大きさが入力信号より小さくなっています（何か変ですよね？）。

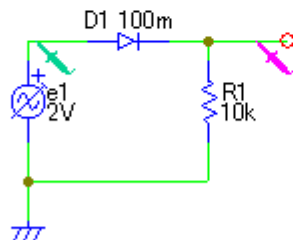


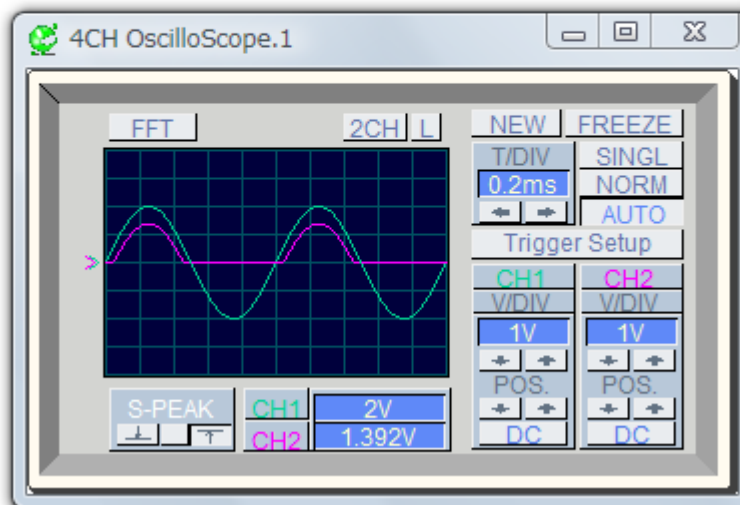
図3-1 半波整流回路

そこで、オシロスコープのFREEZE ボタンをクリックして波形表示を止め、入力と出力の最大値を読み取って確かめてみましょう。入力は2[V]、出力は1.4[V]程度で0.6[V]だけ小さくなっていますね。なぜ、0.6[V]だけ減っているのでしょうか、簡単に説明しておきます。

結論は、第2章の2-8で説明したダイオードの不感領域と称する「順方向電圧降下（カットイン電圧） $E_f$ 」の影響なのです。たとえば、 $E_f = 0.6[V]$  のときは、入力電圧が0.6[V]を超えるとダイオードが導通（on）して電流が流れ始めます。

この順方向電流が抵抗を通ることによる電圧降下分だけ小さい電圧として出力されることになり、入力信号の最大値2[V]は0.6[V]だけ低い電圧1.4[V]しか出力されません。その結果、入力信号より小さめの電圧しか取り出せないことがわかります。

次に、入力電圧の大きさを0.2[V]ずつ増減して変えて実験してみましょう。すると、0.6[V]以下では出力電圧はほぼ0[V]で、ダイオードの不感領域を実感することができます。また、0.6[V]より大きい入力電圧では、その最大値が必ず0.6[V]だけ小さくなって出力されていることがわかります。





### 3-2 全波整流回路

半波整流回路として、正の部分のみを取り出す回路（図3-1）と負の部分のみを取り出す回路（図3-4）を重ねてみましょう。図3-5の回路において、最後の1個のダイオード素子を向きに注意しながら配置して、入出力波形をオシロスコープで観測してみてください。すると、入力電圧の正負の両方を正の値（抵抗には一方向にしか流れないことと等価）として出力する様子を確認できますね。

うまくいかなかったときは、ダイオードの向きを逆にしてみましょう（必ず、うまく動作します）。ここで、得られた出力波形は、半波整流回路とは異なり、入力電圧の正負の両方が使われるので効率がよいこともわかります。

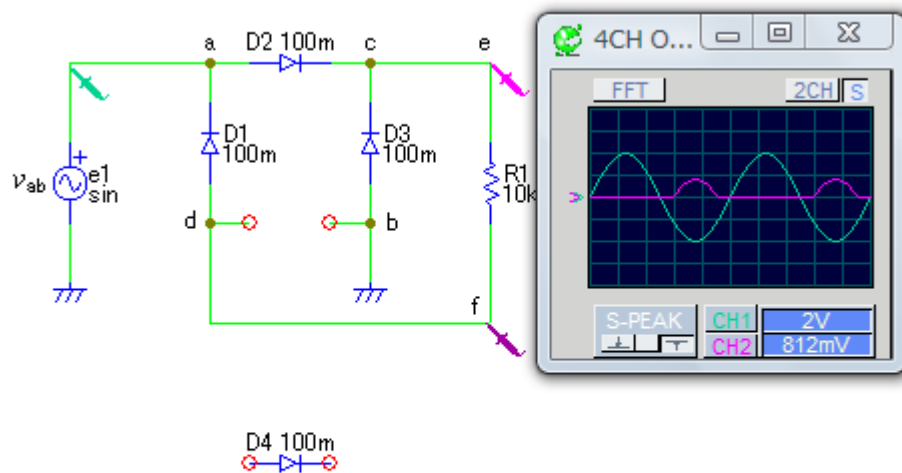


図3-5 全波整流回路

完成した図3-5の回路動作の様子を簡単に説明しておきましょう。入力電圧が正 ( $v_{ab} > 0$ ) のときには、ダイオード D2 と D4 が導通して、 $a \rightarrow c \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow d \rightarrow b \rightarrow g$  と電流の通り道ができます。負 ( $v_{ab} < 0$ ) のときはダイオード D1 と D3 が導通して、 $g \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow d \rightarrow a$  と電流の通り道ができます。正負いずれの場合にも、抵抗 R1 に流れる電流は端子 e から端子 f に向かって流れます。したがって、ef 端子間には入力電圧の正負に関わらず同じ方向に電流が流れて、正の値として出力されることになり、絶対値回路と呼ばれることもあります。

また、4つのダイオードの定格電流をおトクだね実験3-1と同じ値に設定して、理想化するとどうでしょう。ダイオードの不感領域が消滅して、理想的な絶対値回路になることを確かめてみましょう。

次に、図3-5に示す電源  $v_{ab}$  を正弦波以外の信号に変えて、全波整流回路の動作を調べてみましょう。CircuitViewerで入力信号を変えるには、カーソルをえんぴつのアイコンに変えたあと、電源の真上に移動して左クリックします。

すると、電源の種類やパラメータを入力するダイアログが表示されますので、図3-6に合わせて設定してみてください。電源の設定が完了すれば、オシロスコープで入出力波形の変化を観測することによって、入力の絶対値を出力する全波整流回路の機能が理解されます。



図3-6 電源（シグナルジェネレータ）の信号選択



### 3-5 リミッタ（波形の中心部分を取り出す）

入力波形を上下ともあるレベル以下に抑える（あるレベルから上および下を切り取る）回路をリミッタといい、ピーククリップとベースクリップの組み合わせで実現します（図3-13）。図3-13の回路では、入力波形の2[V]から上でダイオードD1が導通し、また電池の向きに注意すれば（-1）[V]から下でダイオードD2が導通します。したがって、出力波形は（-1）～2[V]以外の部分が切り取られる形になり、波形の振幅が制限されます。なお、出力電圧の正負の値は、ダイオードに直列につながっている直流電圧の値で決まります。

リミッタ回路は、正弦波交流電圧から方形波交流電圧に近い波形を作るときに用いられます。また、FMラジオやテレビジョン受信機などの音声回路で**振幅制限回路**として使われます。

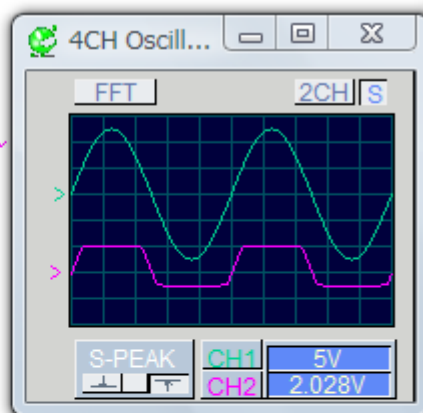
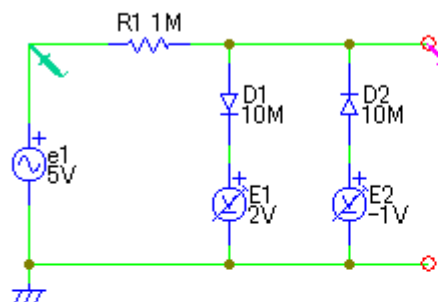


図3-13 リミッタ回路

これまでと同様に、2つの電池の電圧をいろいろに変えて出力される波形を観測して、リミッタの働きを覚えておきましょう。このとき、電池の電圧E1とE2をそれぞれ3[V]、2[V]に設定すると、薄く切って取り出すことができ、とくに**スライサ**と呼ばれています。この回路は、デジタル通信のパルス幅変調回路などに用いられています。



## 第4章 トランジスタ, FET って, どんなもの?

第2章と第3章で半導体やダイオードについて学びましたが, これからはダイオードにさらに制御用の電極を1つの追加した「3本足の魔術師」と称されるトランジスタを中心に解説していきます. 一般にトランジスタといえば, **バイポーラトランジスタ**をいう場合が多いので, ここではバイポーラトランジスタを単にトランジスタと表記することにします.

### 4-1 トランジスタの基本構造

トランジスタの概観の例を図4-1 (a) に示します. 内部は図 (b) のように半導体の小さなチップが3本の電極に接続された構造で, そのチップの断面図は図 (c) のようになっています.

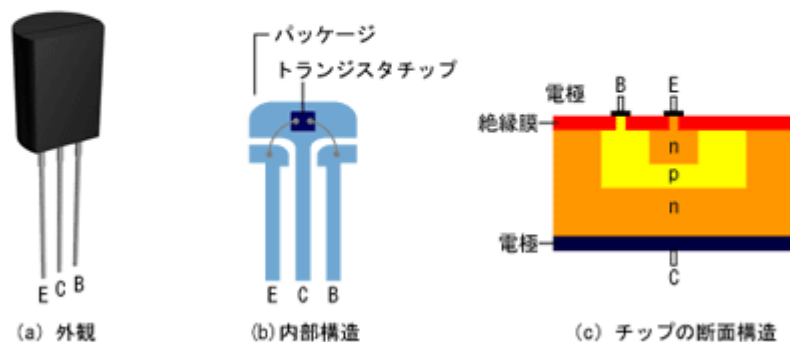


図4-1 トランジスタ

図4-1 (c) のトランジスタチップの断面図を簡略化して示すと, 半導体の結晶の中に, 非常に薄いp形半導体をn形半導体で, あるいは非常に薄いn形半導体をp形半導体でサンドイッチパンのように, 両側からはさみ込むような構造しています (図4-2). ここで, 図4-2 (a) の構造をnpn形トランジスタ, 図 (b) のようなものをpnp形トランジスタといいます.

そしてトランジスタから引き出された3つの端子電極は, それぞれコレクタ (C), ベース (B), エミッタ (E) と呼ばれ, それぞれのトランジスタの回路シンボル (図記号) は図4-3 のように表され,

- コレクタ** (collector) は「キャリアを集めるもの」,
- ベース** (base) は「基準になるもの」,
- エミッタ** (emitter) は「キャリアを放出するもの」

という意味があります.

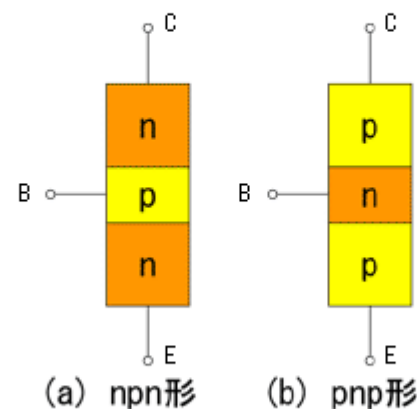


図4-2 トランジスタの構造



### 4-2 トランジスタの基本動作

最初に、トランジスタを動作させるには、ベース・エミッタ・コレクタの各端子に適切な直流電圧を加える必要がありますので、しっかりと記憶に留めてください。

それでは、npn形トランジスタを例にとりて、動作させるための条件を説明しておきましょう。2つのn形ではさまれた非常に薄いp形（ベースB）から下のn形（エミッタE）に順方向電圧、また下のn形（エミッタE）から上のn形（コレクタC）に逆方向電圧をかけてみます。すなわち、上のn形にプラス（+）、下のn形にマイナス（-）をつなぐのです（図4-5）。図4-5の回路では、エミッタEが入力側と出力側の共通端子であり、エミッタ接地といいます。なお、pnp形トランジスタの場合は、図4-5とは逆向きの電圧をかけることになります。

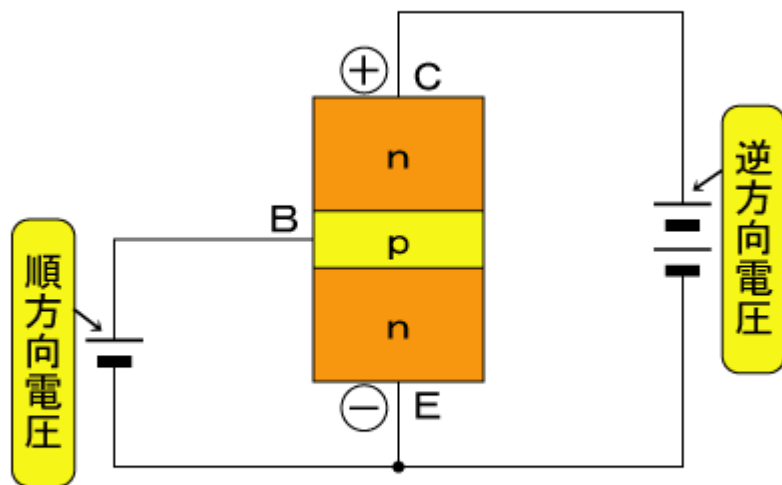


図4-5 バイアス電圧の加え方

すると、電流が流れるはずはないと思われるエミッタ（E）-コレクタ（C）間に、不思議なことに電流が流れるのです。トランジスタの内部でのホールと電子のふるまいを示して、基本動作原理を説明しておきましょう。

- ① 図4-6の回路で、エミッタとコレクタの間に電圧  $V_{CE}$  (= エミッタ-コレクタ間電圧) を印加した状態で、ベースとエミッタの間の順方向電圧  $V_{BE}$  (= ベース-エミッタ間電圧) を加えると、エミッタ領域（n形）からベース領域（p形）に多量の電子（エミッタ領域の多数キャリアに相当）が流れ込み、その一部はベース電流  $I_B$  となります。
- ② エミッタ領域から流れ込む電子は、ベース領域の多数キャリアのホールと結合してコレクタ領域（n形）には到達しないように思われますが、ベース領域は非常に薄く作られているため、ほとんどの電子はベース領域を通り抜けて、コレクタ領域に達します。
- ③ コレクタ領域に到達した電子は、コレクタに正の電圧が加わっているために、コレクタ電極に強く引き寄せられて移動し、コレクタ電流  $I_C$  となります。

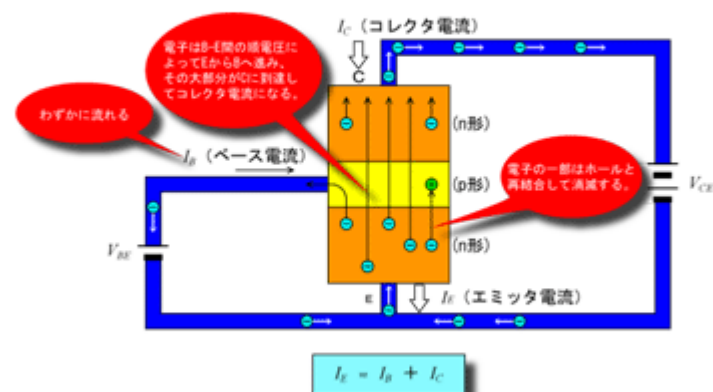


図4-6 トランジスタ内部でのホールと電子の振る舞い





### 4-7 接合形FETの基本動作

それでは、接合形FET（nチャネル）の動作原理を簡単に説明しておきましょう（図4-13）。

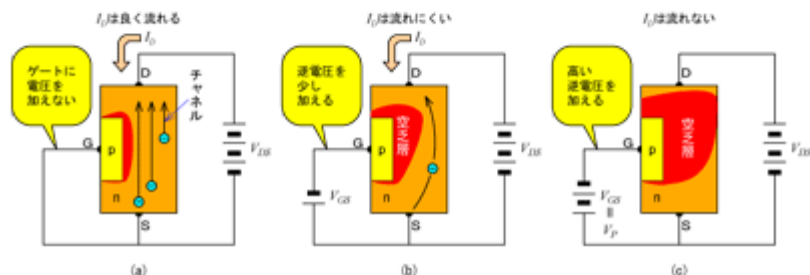


図4-13 接合形FET（nチャネル）の基本動作

- ① 図 (a) のように、ゲート G に電圧を加えず、ドレイン（⊕極）とソース（⊖極）に電圧  $V_{DS}$  を加えると、n形領域の電子（多数キャリア）はドレインの ⊕ 極に引き寄せられて、ドレイン D からソース S に向かう電流  $I_D$ （実際にはソース S からドレイン D に向かう電子の流れなのです）が十分に流れます。このドレイン・ソース間を流れる電流  $I_D$  は、**ドレイン電流** といいます。
- ② ところが、図 (b) のように、ゲート（⊖極）とソース（⊕極）に逆バイアス電圧  $V_{GS}$  を加えると、pn 接合付近のところに空乏層（アミカケ部分）が拡がります。すると、ドレイン電流は空乏層によって電子の通り道（チャネル）の幅を狭められることになるので、流れにくくなります。
- ③ 図 (c) のように、さらに G-S 間の逆バイアス電圧  $V_{GS}$  を上げる（大きくすると、空乏層がチャネルを完全にふさぐようになり、ドレイン電流  $I_D$  はまったく流れません。このときの電圧を **ピンチオフ電圧**  $V_p$  といいます。

このように、G-S 間の逆バイアス電圧のかけ方で、ドレイン電流の大きさを制御できることから、電圧制御形の回路素子であることがわかります。この電圧制御の働きを利用することにより、増幅作用を実現できるのです。また、電流の主体が単一キャリア（この例では、n形領域の電子）であることから、バイポーラトランジスタに対して、FET は **ユニポーラトランジスタ** と呼ばれることがあります。

まとめておくと、接合形FETは次の点で、バイポーラトランジスタは大きく異なるので、しっかり覚えておきましょう。

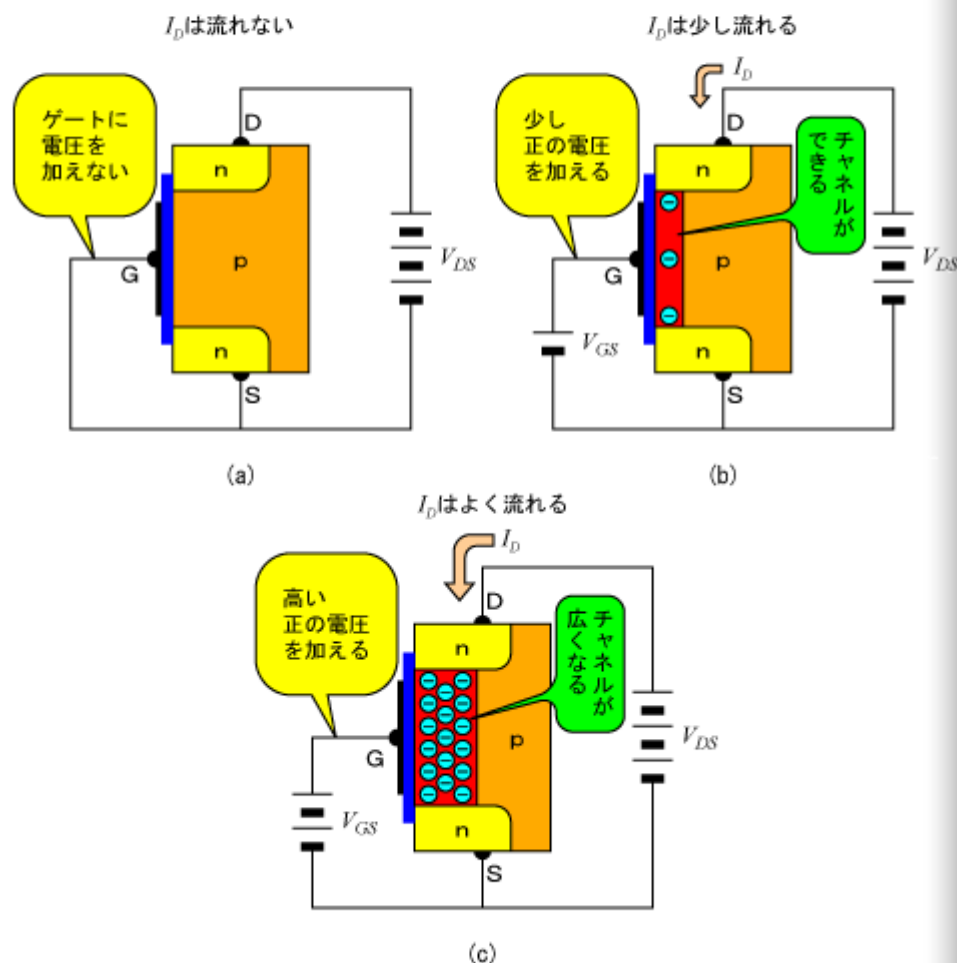
- (i) ゲート・ソース間に逆バイアス電圧を加えるため、ゲート電流  $I_G$  は流れない
- (ii) ゲートに加える電圧によってドレイン電流を制御する、いわゆる“電圧制御形”の回路素子である

(i) の逆バイアスでは、ダイオードのところでも解説したように、G-S 間にはゲート電流が流れない（実際には本当にほんの少しだけ漏れ電流というものがあります）わけですから、トランジスタに比べればかなり省エネ（低消費電力で、電池の持ちが長いことに関係する）であるという特徴もっています。なぜなら、トランジスタでは B-E 間にベース電流を流さない限り、C-E 間に流れるコレクタ電流は制御できないわけですから、制御用のベース電流が常に電気を消費して、むだ使いしているのです。電池の持ちも短くなります（携帯電話の待ち受け時間が非常に短いわけで、充電を頻繁に行うことになりますよ、いやですね）。



### 4-10 MOS FET の動作原理

それでは、エンハンスメント形 MOS FET (n チャンネル) の動作原理を簡単に説明しておきましょう (図 4-18)。



前頁 図 4-18 エンハンスメント形 MOS FET (n チャンネル) の基本動作

- ① 図 (a) のように、ゲート G に電圧を加えず、ドレイン D (⊕極) とソース S (⊖極) 間に電圧  $V_{DS}$  を加えると、ちょうどドレイン・ソース間は n-p-n のトランジスタとなって、ドレイン・ソース間には電流は流れません。
- ② ところが、図 (b) のように、ゲート G (⊕極) に正の電圧をかけると、p 形領域との間、まずは空乏層ができます。酸化膜を通して正の電圧に引き寄せられて、ゲートの下側の基板表面上に電子が集まり、薄い n 形領域 (n チャンネル: 電子の通り道) が作られ、ドレイン・ソース間が n-n-n となり、電流が流れるのです。この n チャンネルの厚みはゲート電極に印加される電圧  $V_{GS}$  で制御されます。
- ③ 図 (c) のように、ゲートに加えた正の電圧を大きくしていくと、p 形領域の少数キャリアの電子が酸化膜を通して正の電圧に引き寄せられて、ゲートの下側の基板表面上に電子が集まり、薄い n 形領域 (n チャンネル: 電子の通り道) が作られます。すると、ドレイン・ソース間が n-n-n となって電子の通路が完成し、電子はドレイン D (⊕極) に引き寄せられるので、電子の移動方向とは逆の向きにドレイン電流  $I_D$  が流れるのです。なお、電子の通路である n チャンネルの幅はゲート G に印加されるゲート電圧  $V_{GS}$  で制御されます。なお、薄い p 形層 (p チャンネル: 正孔の通り道) が作られるエンハンスメント形 MOS FET (p チャンネル) では、3 つの端子 (S, G, D) に加える電圧の極性が反対になることも覚えておいて下さい。

このとき、ドレイン電流  $I_D$  が流れ始める電圧  $V_P$  はピンチオフ電圧で、

$$I_D \propto (V_{GS} - V_P)^2 \quad (4-9)$$

という関係があります。ここで、式 (4-9) の記号「 $\propto$ 」は、比例することを表します。



## 第5章

### トランジスタによる信号増幅にチャレンジしてみよう！

増幅回路は、あらゆる電子回路の基本になるものです。たとえば、カラオケマイクに入る歌声が、スピーカから大きな音として聞こえてくるのは、この間に微弱な電気信号（空気の振動である声に変換されたもの）を大きくする働きをする信号増幅回路のおかげなのです。このような増幅回路の考え方をしっかりと理解しておくことが、いろいろな電子回路の解析、設計に大いに役立ちます。

まず、簡単なトランジスタ増幅回路において、信号波形の伝達・変形の様子を調べることにより、直流分と交流分が重ね合わさって信号増幅が実現できていることを説明します。つまり、トランジスタを増幅素子としての機能を引き出すためのバイアス回路、増幅度計算、等価回路などについての知識を深めていきましょう。

### 5-1 増幅の基礎

増幅とは、「入力信号の振幅を大きくして出力すること」をいい、信号増幅する回路を増幅回路といいます（図5-1）。図5-1は増幅の原理を示したもので、電源から供給される直流の電気エネルギーが、たとえば、マイクロホンやセンサなどからの小さな入力信号によって制御され、大きな信号に変換出力されています。

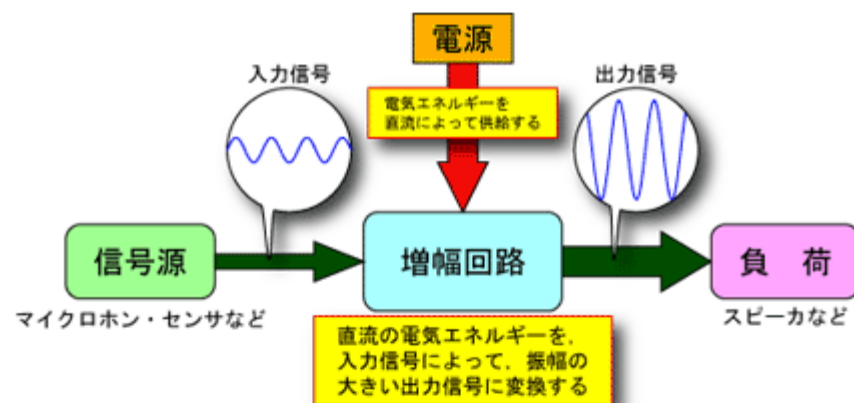


図5-1 増幅の原理



### 5-2 トランジスタ増幅回路における各部の電圧

まず、図5-4のバイポーラトランジスタ（npn形）を用いた回路の増幅動作を調べてみましょう。回路シミュレータで作成したもの（図5-5）を実験回路として利用することにし、トランジスタについては図5-6のような簡単な電気的な性質を仮定します。（図5-6におけるトランジスタの電気的性質）

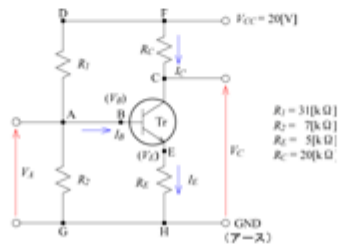


図5-4 トランジスタ増幅回路の例

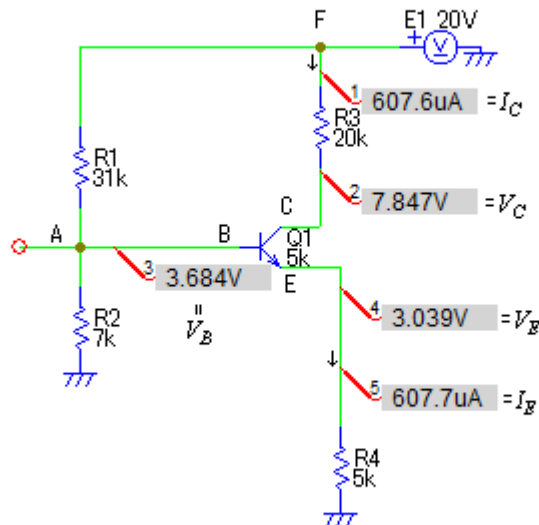


図5-5 トランジスタ増幅回路の実験

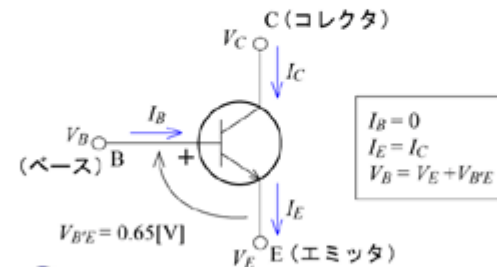


図5-6 トランジスタの電気的性質

それでは、図5-4において  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$ ,  $V_E$  (それぞれA点, B点, C点, E点の電位) を筆算で求めてみましょう。これらの電位は“直流電位”と呼ばれ、トランジスタを動作状態におくための電圧を印加しています。前述の性質のよりベース電流  $I_B = 0$  ですから、 $V_A$  は次のように計算されます。図5-7から明らかのように電源電圧  $V_{CC} = 20[V]$  を抵抗  $R_1$  と  $R_2$  で分割するわけですから、

$$V_A = V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{7[k\Omega]}{31[k\Omega] + 7[k\Omega]} \times 20[V] \approx 3.684[V] \quad (5-1)$$

となります。

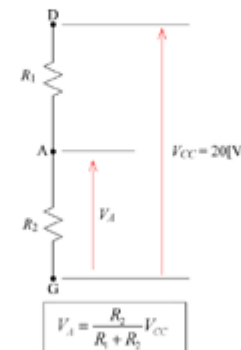


図5-7 電圧の分割（分圧）計算



見てみましょう。たとえば、正弦波入力信号の交流分の振幅  $v_g$  を 0.2 [V] として、直流分（バイアス電圧）の大きさを変化させて、出力信号波形を調べます。すると、うまく電圧を加えた（すなわち、バイアスをかけた）ときには、入力する交流信号のすべてが増幅されることがわかります（少し、手間がかかるかもしれませんが、いろいろな値に電圧を変えてみてください）。なお、縦軸（電圧）は見やすいように、目盛レンジを適切に変えてみるとよいでしょう。

このときのドレイン電流  $i_D$  は、図 6-6 のようになりますが、しきい値電圧  $V_{TH}$  以上での  $I_D - V_D$  特性の直線部分（正比例）のところを利用して増幅することになります。

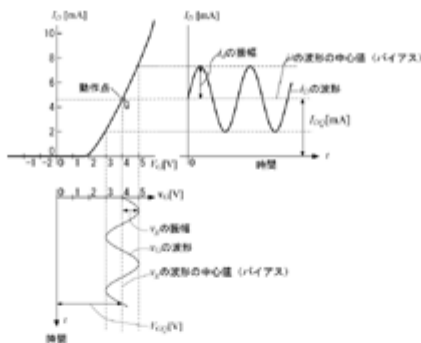


図 6-6 ドレイン電流  $i_D$  の波形（適切なバイアスをした場合）

いま、直流バイアスのゲート電圧  $V_{GG}$  を、

$$V_{GG} - V_{TH} > v_{in} \quad (6-8)$$

となるように定めると、図 6-6 に示すように、ドレイン電流  $i_D$  の波形は入力の正弦波交流の電圧波形  $v_{in}$  と相似になり、交流分と直流分が加算された波形となります。このとき、交流分の中心値（直流バイアス電圧、電流に相当）は、

ゲートソース間電圧  $v_G$  の中心値 =  $V_{GG}$

ドレイン電流  $i_D$  の中心値 =  $I_{D0}$

となります。

### 6-4 適切なバイアスとは

6-3でバイアス電圧を変えて実験したところ、出力波形がひずんで正弦波となっていない場合とか、上下が非対称となる場合とか、いろいろな波形が見られると思います。図 6-7 では、バイアス電圧が 4 [V]、交流分が 0.2 [V] であり、オシロスコープの下部に表示されている S-PEAK ボタンを切り替えて、入出力信号の上限値と下限値はそれぞれ、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{入力信号の上限値} = 4.199 \text{ [V]}, \text{ 下限値} = 3.801 \text{ [V]} \\ \text{出力信号の上限値} = 8.933 \text{ [V]}, \text{ 下限値} = 5.772 \text{ [V]} \end{array} \right.$$

と読み取れます。よって、上限値と下限値の差（peak to peak 値）から、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{入力信号（交流分）} (4.199 - 3.801) / 2 = 0.20 \text{ [V]} \\ \text{出力信号（交流分）} (8.933 - 5.772) / 2 = 1.63 \text{ [V]} \end{array} \right.$$

と計算できます。実は、図 6-7 の回路は入力信号の振幅を 8 倍して出力する増幅回路（理論的な検討は後述）になっていますので、入力電圧 0.2 [V] の 8 倍としてほぼ 1.6 [V] が出力されることが実験結果からも得られ、なるほどと納得できます。

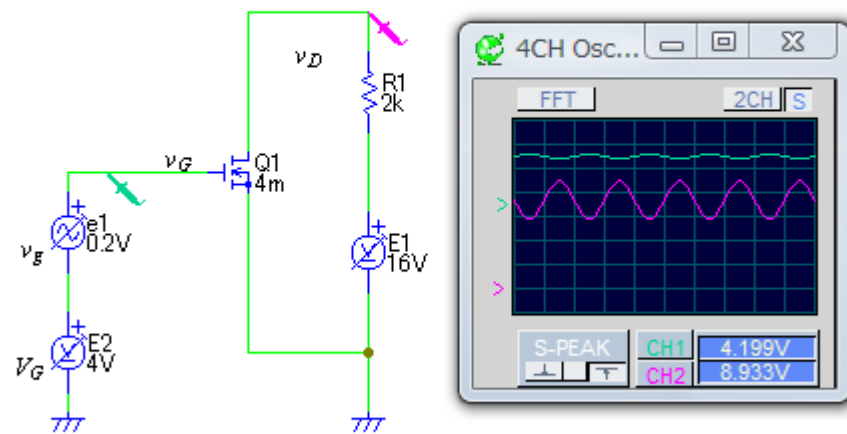


図 6-7 バイアス電圧、ゲート電圧の変化に対する信号波形