

電子回路基礎

アナログ電子回路・デジタル電子回路の基礎と応用

月曜2時限目 教室:D205

天野英晴

hunga@am.ics.keio.ac.jp

講義の構成

第1部 アナログ編

(4/9, 4/16, 4/23, 4/31, 5/7)

- 1 ダイオードの動作と回路
- 2 トランジスタの動作と増幅回路
- 3 トランジスタ増幅回路の小信号等価回路
- 4 演算増幅器その1
- 5 演算増幅器その2

講義の構成

第2部 デジタル編

- 5 CMOSの基本回路
- 6 CMOSの動作原理とレイアウト
- 7 CMOSの静特性と動特性
- 8 特殊な入出力
- 9 フリップフロップの動作原理、基本回路
- 10 フリップフロップの動特性とStatic Timing Analysis
- 11 メモリ回路
- 12 FPGA設計
- 13 電子回路シミュレーション

授業の流れ

- 授業中の演習によって理解する
- テキストを予習すべし
 - 前回の演習の答え合わせと復習
 - 小テスト 10分 資料を見て良いが相談ダメ
 - 授業その1
 - 演習その1 相談可、質問可
 - 授業その2
 - 演習その2 相談可、質問可
- 授業内容によってフレキシブル

講義資料

- 講義で使う電子資料：
<http://www.am.ics.keio.ac.jp>で配布
- 演習の結果はkeio.jp(RENANDI)で公開
- 参考書
高橋進一，岡田英史共著，培風館，「電子回路」
天野英晴、コロナ社「デジタル設計者のための電子回路」

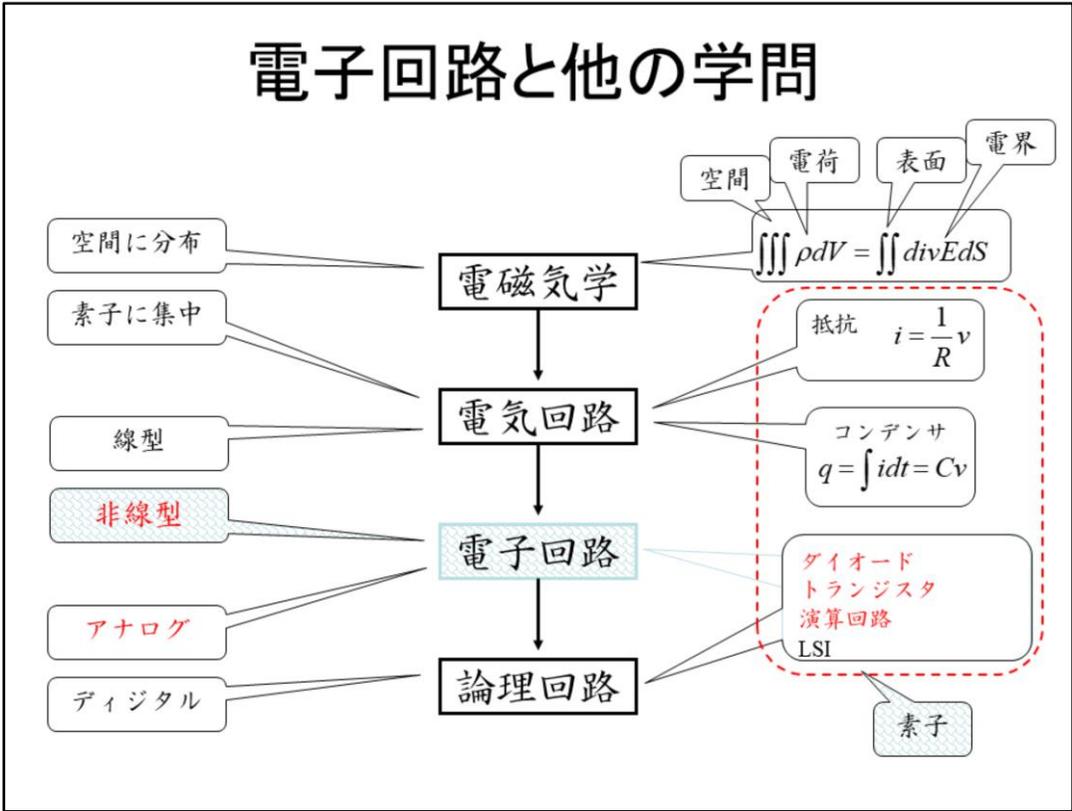
評価

- 演習の点＋小テストの点＋SPICE実習の点
＋試験の点で機械的に切る
- 演習点は2問で1点
- 小テストは1問1点
- SPICE実習は10点
- 70%がAになる。落とした人は少ない

0. 電子回路を学ぶ前に

- 関連科目との関連
- 情報機器の基盤技術：電子回路
- アナログとデジタル
 - 連続と離散
- 電気回路と電子回路って何？

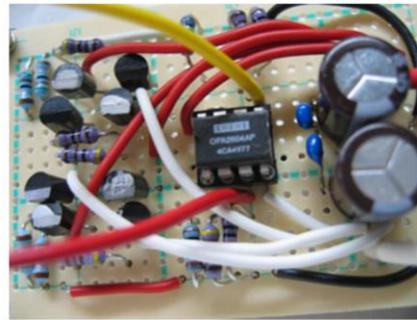
電子回路を学ぶ前に最低限必要な常識を勉強しましょう。これはみなさん既に知っていることばかりです。



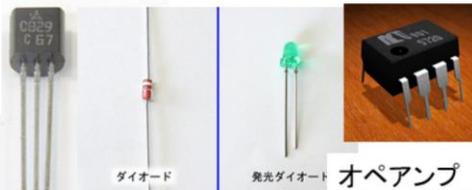
電子回路は他の科目とどう違うのでしょうか？電磁気学は物理学に入り、みなさんも勉強したことがあるでしょう。電磁気は空間に分布している電荷、電界について勉強します。最近ではワイヤレスネットワークは非常に重要で、情報工学科でも無線技術は重要です。これに対して素子に集中した電気の現象を学ぶのは電気回路で、抵抗、コンデンサ、インダクタからなる回路の電流、電圧の静的動的な変化を勉強します。計算が大変で、動的な変化の解析には微分方程式など必要なので嫌いになっちゃった人も居るかと思います。電気回路と電子回路の違いは何でしょう？電気回路は線形の素子を使いましたが、電子回路はダイオードやトランジスタなど非線形素子が中心になります。じゃ、もっと難しいか？というと、YesでもありNoでもあります。非線形素子を使って増幅、演算処理を行うので、当然電気回路より複雑で難しいところもあるのですが、逆に手計算で解くことは不可能に近いので、解析を行うときはモデル化して簡単にするか、コンピュータでシミュレーションをします。なので、面倒な計算や微分方程式を解く必要はありません。論理回路はこのモデル化の一種といえます。これはこの授業の範囲に入ってきます。

情報機器の基盤技術：電子回路

- スピーカー：フェライト
- チップセラミックコンデンサ：Ag, Pd, Ti, Ba, Pb, Ni, Zr
- チップコイル：Cu
- カメラ：Cu, Ni, Au
- チップタンタルコンデンサ：Ta, Ag, Mn
- ボタン電池：Ag
- 振動モーター：Nd
- チップ抵抗：Fe, Ag, Ni, Cu, Pb, Zn
- 液晶：In, Sn
- ガラスエポキシ基板：Cu, SiO₂, (Br)
- はんだ：Pb, Sn
- 水晶振動子：Si, Cu, Ni
- IC：Au, Ag, Cu, Si
- プラスチック：Sb
- イヤホンジャック、ACジャック：Au
- ボタン接点：Fe, Ni, Cr, Ag



オーディオアンプ



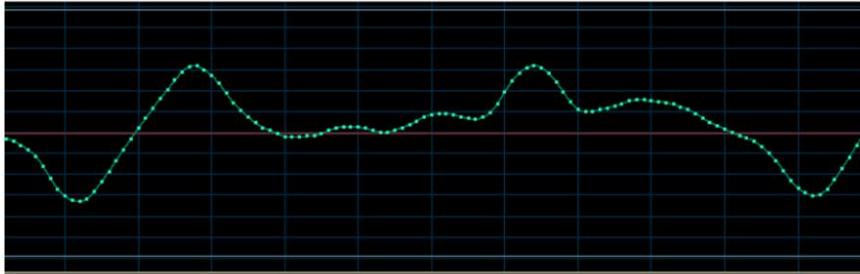
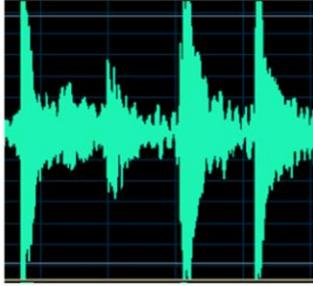
トランジスタ

ダイオード

オペアンプ
(演算増幅器)

電子回路は情報機器の基盤技術です。この授業は、今までやってきた電磁気や電気回路と違って実際の情報機器に直結した知識の習得を目指します。ひとつ断っておくと、この授業は体系的ではありません。要するにこれから情報工学科でやっていくのに必要な知識をピックアップして並べてお話ししているだけで、アナログ回路の体系やデジタル論理回路の体系だって教えることをしていません。なぜか？ここで体系だった勉強をやるよりも、みなさんに今不足しているのは実際的な知識だからです。ここでやる話は、これから情報工学科で生きていくためには、絶対に必要な知識であり、知らなかったら恥ずかしいレベルの話です。通信、画像処理、コンピュータ、ソフトウェア、専門に関わらず、必要です。魅力的な製品を作ろうと思ったら、現在使われているデバイスの動向を知ることは不可欠です。CMOSもフラッシュROMもFPGAも知らないで、IT社会で食っていくことはできません。

アナログ波形

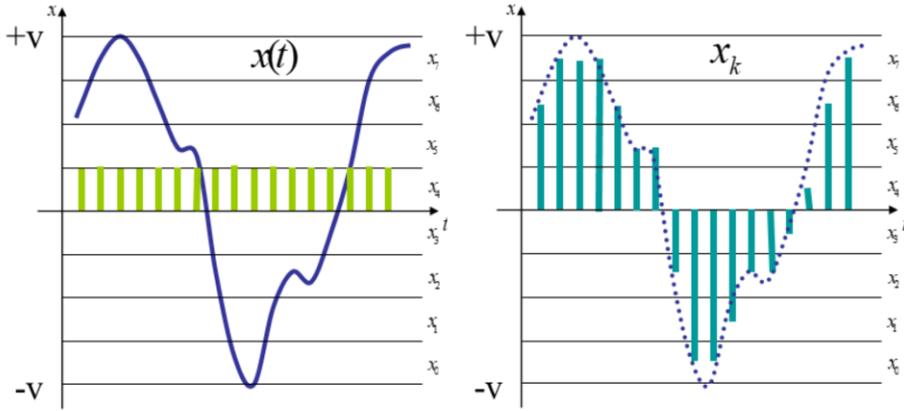


さて、ここでアナログとデジタルの違いを説明しましょう。アナログと聴いてどのような印象を受けるでしょう？この図はオシロスコープで見た電圧のアナログ波形です。電圧が連続的に変化しているのが分かります。音声でも画像でも、世の中の本質は連続値で表現するアナログなのです。

アナログとデジタル

連続と離散

連続な電圧変化 → 標本化 → 離散的な電圧計測値



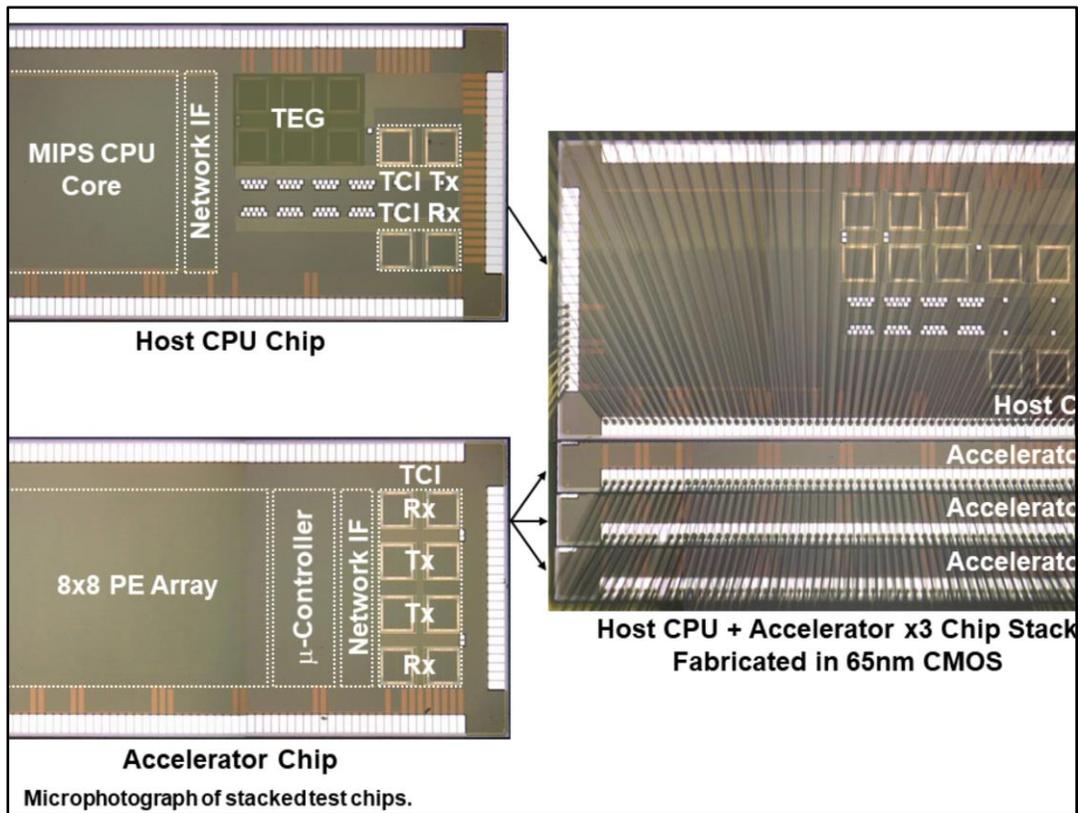
連続な電圧値 → 量子化 → 8種類の電圧値

アナログが連続値なのに対して、デジタルはこれを離散的な値で表現します。この図は8レベルに量子化(標本化)した例です。8レベルで表現すれば3ビットの2進数で表すことができます。これがデジタル的な表現です。量子化することで連続値はデジタル回路で扱うことができます。このような方法でデジタル回路は、オーディオ、ビデオ、テレビなど様々な分野に進出してアナログ回路に代わって使われています。しかし量子化することにより、ノイズやひずみが生じます。みなさんもオーディオファンがCDの音に文句を言うのを聞いたことがあるかと思います。この微妙な差を聞き分ける人も居るのです。

なぜアナログを？

- 本当はデジタルの方が簡単なのでそちらを先にやりたい
- 基本的にアナログ電子回路は電子工学科の領分
- 今、何でもデジタルなのに、なぜアナログを？
 - 計算機基礎との関係、論理設計をやってからの方がデジタル回路の解説がうまく行く
 - 今はやりはミックスドアナログ・デジタル
 - 日本半導体の一部はこれで生きようとしている

さて、なぜこの授業ではアナログ回路を含めて電子回路をやるのでしょうか？実を言うとアナログとデジタルを比較するとデジタルの方がずっと簡単なモデルを使うので理解するのも簡単です。これが今、デジタル機器が繁栄している一つの理由です。また情報工学科としてはデジタルの方がずっと重要で、アナログはどちらかというと電子工学科の領域です。で、最初にアナログっぽいことをやるのには理由があります。一つの理由は、計算機基礎で論理回路の基本を勉強するからです。この授業は計算機基礎とやるのが多少オーバーラップしています。計算機基礎では論理設計を中身の話を抜きにして勉強し、この授業ではその中身をお話します。この点で計算機基礎で論理設計をやっている間は、関連の薄いアナログをやっていた方がうまく行くためです。もう一つの理由は、これから新しいIT製品に挑戦するためには、アナログだのデジタルだの区別しないで考えるのが良いからです。大規模デジタル回路の製造プロセスを失った日本は、アナログとデジタルを混載したミックスドデジタルで生き残りを図っています。

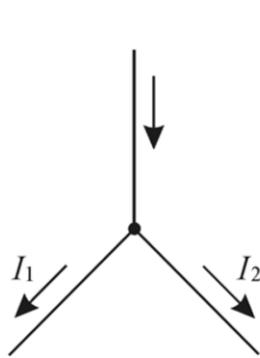


我々の研究室で開発するチップも多くはアナログ回路とデジタル回路がミックスされています。この図は、誘導結合によるワイヤレスチップ間通信を使ったマルチプロセッサです。この四角の部分のコイルで、これを重ねることで、チップ間にネットワークが形成されます。これは電子工学科の黒田研と一緒に開発したチップですが、デジタルとアナログを両方兼ね備えたチップにこれからの発展の可能性がります。

オームの法則

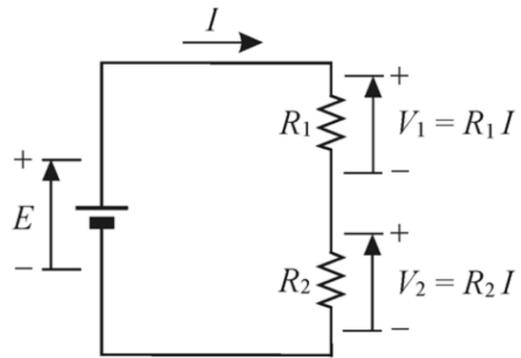
- $V=R \times I$
- $I=V/R$
- $R=V/I$
- さすがにこれは説明は要らないだろう、、、、

キルヒホフの法則



$$I = I_1 + I_2$$

(a) 電流則

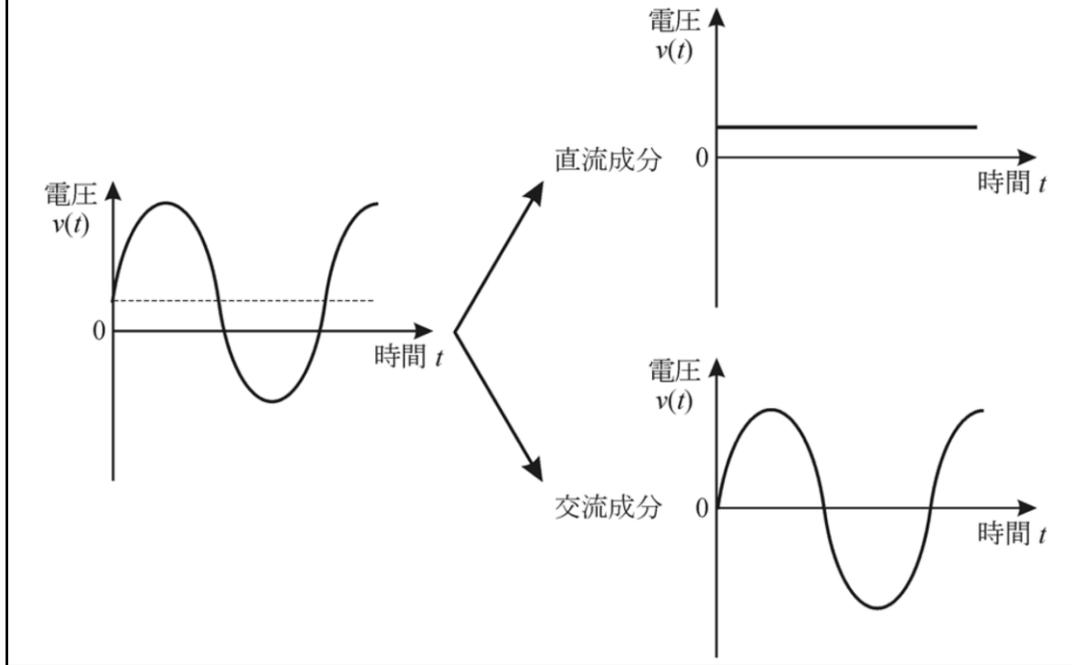


$$E = V_1 + V_2$$

(b) 電圧則

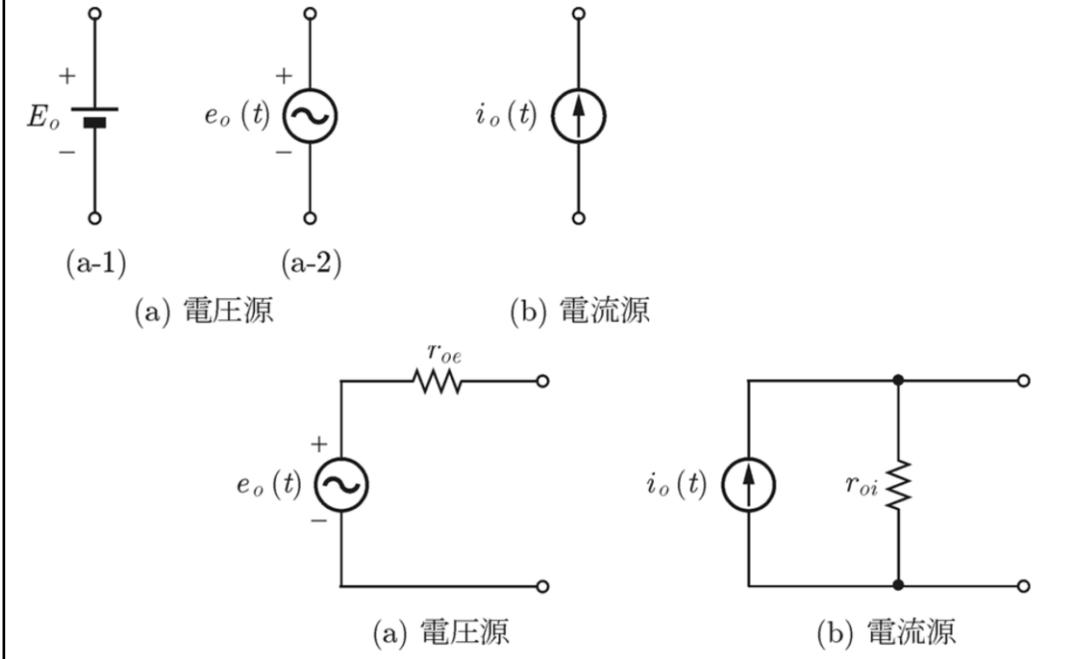
さて、それでは電気回路の中に入るとはいえ、ここでも使うことを復習しておきましょう。いずれもみなさんが良く知っていることです。まずキルヒホフの法則です。この法則は要するに電流も電圧も勝手に湧いてこないしどっかいつちやったりしないというものです。電流則は流入する電流と流出する電流の総和は等しいという法則です。電圧則は、抵抗で電圧降下をする分を足していくと電源電圧と等しくなるという法則です。いずれも直感的に理解しやすいと思います。

交流と直流



直流(DC)とは常に一定のレベルの信号を指します。これに対して交流(AC)は、一定の周期で変化する信号を指します。アナログでは正弦波を想定します。これがデジタルでは方形波になります。波の振動の間隔を周期、その逆数を周波数と呼びます。

電圧源・電流源



直流電圧源を(a-1)の記号で表します。長い棒の方がプラスです。(a-2)の記号が交流の電流源です。この場合、あまり+-は重要ではないです。電流源の矢印は流れる方向を示します。電流源は電圧源と違って中々理解し難いのですが、実は電子回路では良く使います。上の記号は理想的な電圧源と電流源を示しますが、現実の電池には内部抵抗があり、電流が流れると電圧が降下します。同じように電流源にも並列に内部抵抗を考えるのが普通で、電流源の電流が全て外に取り出せるわけではないです。

電子回路での電源、グランド



電源のプラス側
VccとかVddとか書いてある

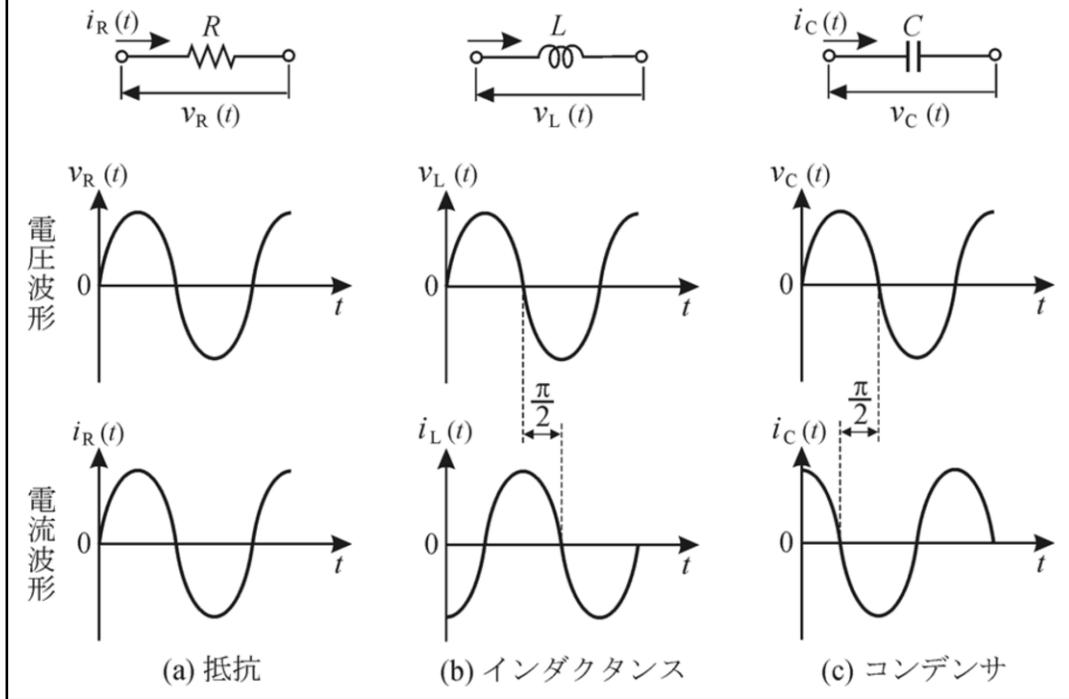


電源のマイナス側
グランド、0V

電子回路の回路図では通常電圧源や電流源は書きません。これは、回路が複雑になると電源の+側と-側の線がたくさん必要になってごちゃごちゃするためです。

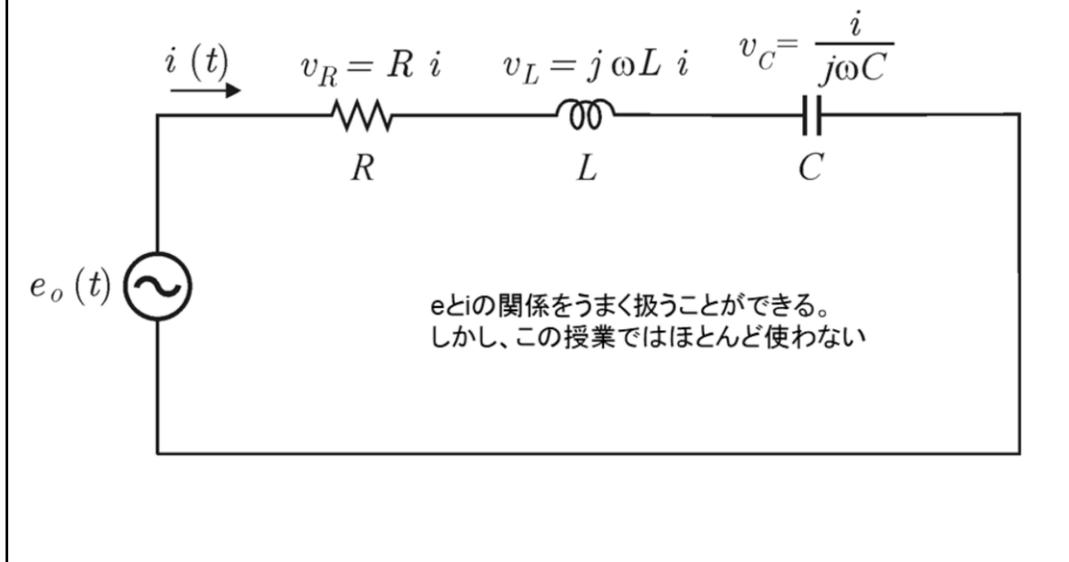
電源は、T字型にします。横棒を太くする場合、接続を示す黒丸を付ける場合もあります。VccとかVddとか書かれていることが多いです。電源の-側をグランドと呼びます。これが0Vでこの回路の電圧の基準になります。地面を表す印を使います。電源の記号はT字型になるように、グランドの記号は地面の部分の下になるように書いてください。

基本電気回路素子の性質



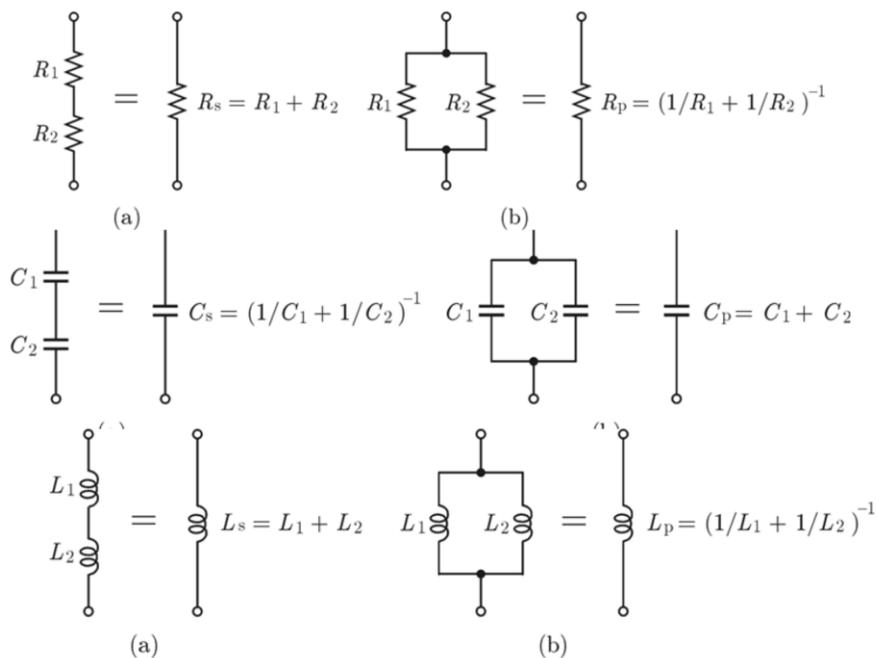
さて、次に交流に対する特性を復習しましょう。抵抗は単純で、電圧に対して同じ位相の電流が流れます。しかしインダクタンスは、電圧変化に対して電流が90度($\pi/2$)遅れて流れます。一方、逆にコンデンサに流れる電流は位相が90度進んでいます。

各素子のインピーダンス



虚数 j と角周波数 ω を使うと、電圧と電流の関係が一つの式で表せます。とても便利は表記法なので電気回路では頻繁に使いますが、この授業ではほとんど使いません。

回路素子の直列・並列接続



抵抗は直列に繋ぐ場合、その値の和になり、並列接続は逆数を足して、答えを逆数にします。コンデンサは逆で、並列に繋ぐとその値の和になり、直接接続は逆数を足して、答えを逆数にします。インダクタは抵抗と同じです。抵抗の並列接続の計算は面倒ですよね。さて、皆さんは高校の頃から、式はなるべく値を代入しないでそのままにしておけ、と言われていたかと思いますが。電子回路ではこの考え方は止めてください。多くの場合は、実際の値を計算して置き換えていった方が良いです。その方が間違いも分かりやすく、電圧、電流、抵抗などのリアルな値が実感できます。

単位

10^{-3}	m	ミリ	10^3	K	キロ
10^{-6}	μ	マイクロ	10^6	M	メガ
10^{-9}	n	ナノ	10^9	G	ギガ
10^{-12}	p	ピコ	10^{12}	T	テラ
10^{-15}	f	フェムト	10^{15}	P	ペタ

電子回路では様々なオーダーの数値が使われます。周波数はキロからギガくらいまでです。例えば最速の計算機の動作周波数は3GHz程度です。これに対応してデジタル回路の遅延はナノ秒のオーダーになります。コンデンサの容量はマイクロからピコです。抵抗は1 Ω (オーム)以下から1M Ω まで広い範囲の数値が使われます。

1. ダイオードの動作と回路

ダイオードは、アナログ回路の最初に出てくる素子だが動作は極めてデジタル的！

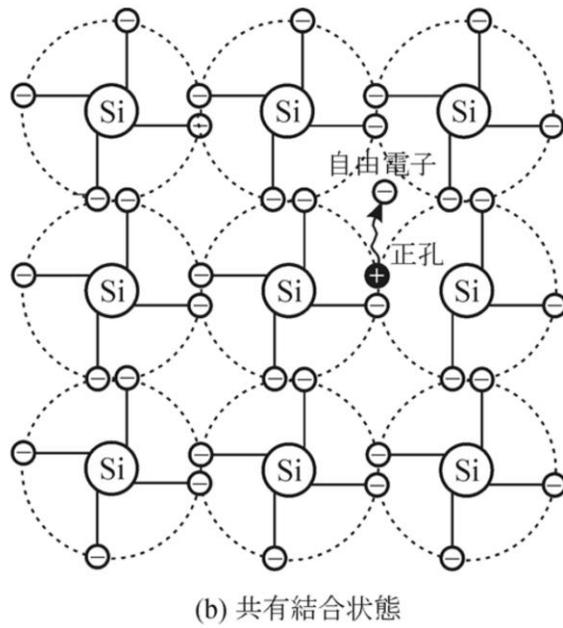
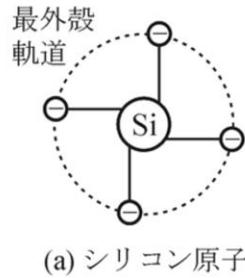
- 半導体の動作原理
- ダイオードの動作
- ダイオード回路

さて、それでは今日のメインテーマのダイオードを説明しましょう。ダイオードはトランジスタを紹介する前に紹介しないわけには行かないデバイスですが、動作は極めてデジタル的です。しかし、現在あまりデジタル回路には使われません。

真性半導体

- 例: シリコン

– 自由電子数 = 正孔数



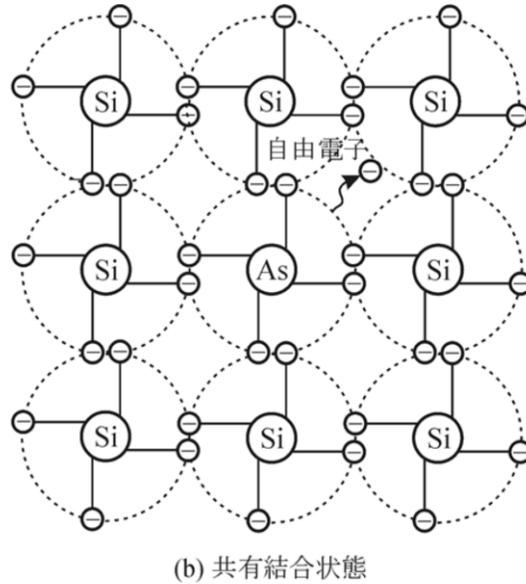
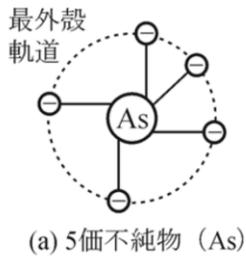
まずは半導体を復習しましょう。現在半導体として最も良く使われるのはシリコンです。シリコン原子は4つの電子を持ち、共有結合状態となり、安定しています。時々この構造から飛び出した電子が生じます。これを自由電子と呼び、飛び出した穴を正孔(ホール)と呼びます。正孔は正の電荷を持った粒子のように働きます。

不純物半導体 (n型半導体)

- 5価の不純物としてヒ素AsをSiに混入

– 自由電子が発生

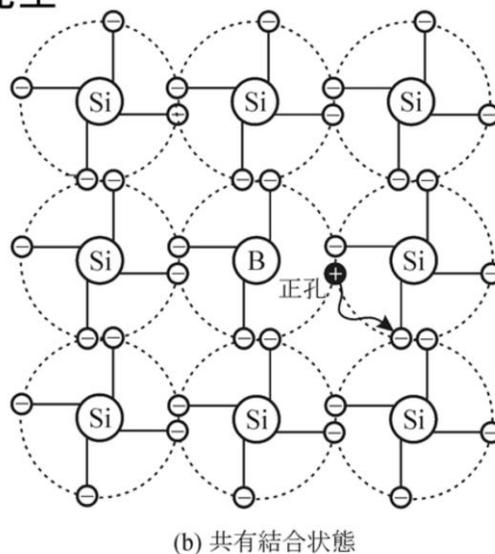
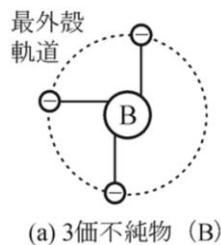
(ドナー)



ここに、5個の電子を持つ不純物、例えば砒素をまぜてやります。そうすると、共有結合状態を取った場合に自由電子が生じます。この場合の砒素をドナーと呼び、自由電子が一定の割合で存在する半導体をn型半導体と呼びます。

不純物半導体 (p型半導体)

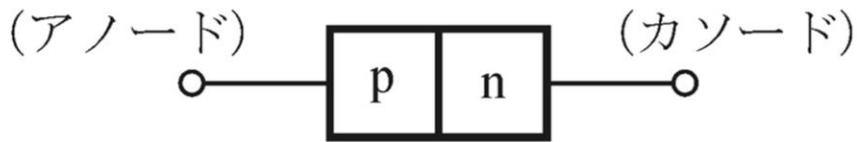
- 3価の不純物としてホウ素BをSiに混入
 - 電子が不足し正孔が発生 (アクセプタ)



逆に電子を3個持つ不純物、ここではホウ素を混ぜると、正孔が生じます。この場合のホウ素をアクセプタと呼び、こうしてできた正孔が多く持つ半導体をp型半導体と呼びます。

ダイオード

- pn接合 (p型半導体とn型半導体の接合)

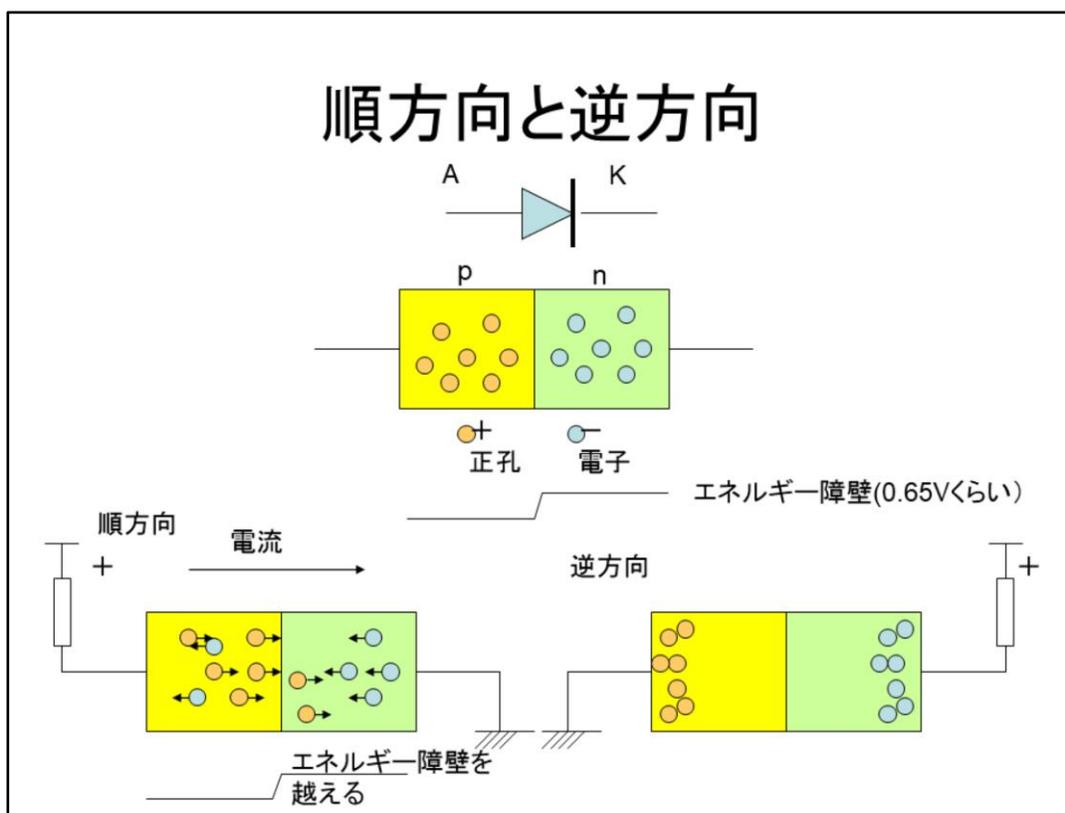


(a) 構造



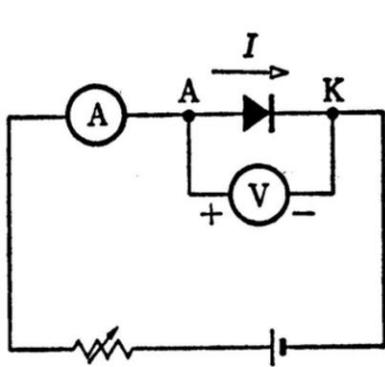
(b) 記号

p型半導体とn型半導体を結合して作ったのが最も簡単な半導体デバイスであるダイオードです。p型の方をアノード、n型の方をカソードと呼び、矢印に棒をつけた記号で表します。矢印は電流の流れる方向を表します。ダイオードに限らずp→n方向に矢印を付けるのが記号の基本的なルールになります。

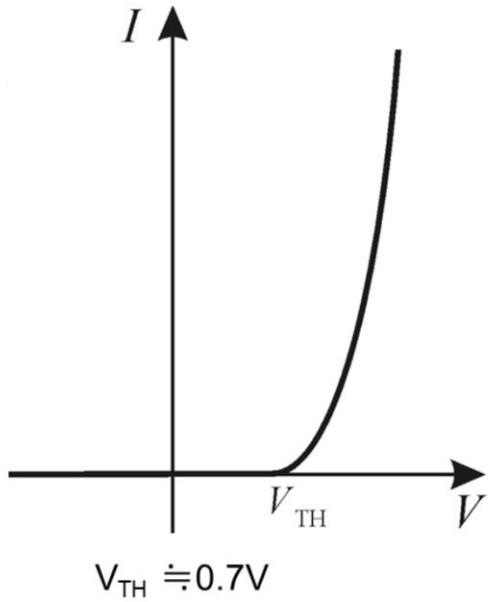


p型半導体の中には正の電荷を持つ正孔が、n型半導体の中には負の電荷を持つ電子があります。ではこの両者がなぜ混ざり合わないか、というと、実はpn接合を行うと接合面には0.65V程度のエネルギー障壁が生じ、何も電圧を掛けない状態ではこれを越えて移動することができません。ここで、アノード側をプラス、カソード側をマイナスにすると、プラスの電圧に押された正孔はエネルギー障壁を乗り越えてn型領域に侵入し、逆にマイナスの電荷を持った電子はプラスの電荷に引っ張られてp方の領域に入ります。こうして電流が流れます。電流は電子の動きと反対方向になる点にご注意ください。これが順方向です。一方、カソード側にプラスを掛けると、電子はプラスの方向に引かれ、正孔は逆にグランド方向に引かれ、電流は流れません。これが逆方向です。

ダイオードの電流－電圧特性

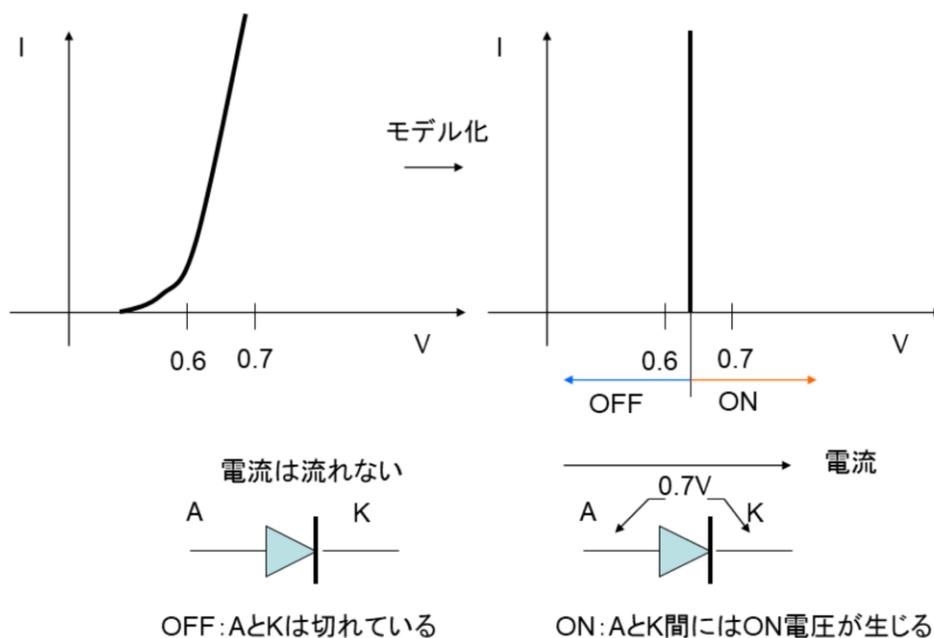


(a) 測定回路 (A, V はそれぞれ電流計, 電圧計)



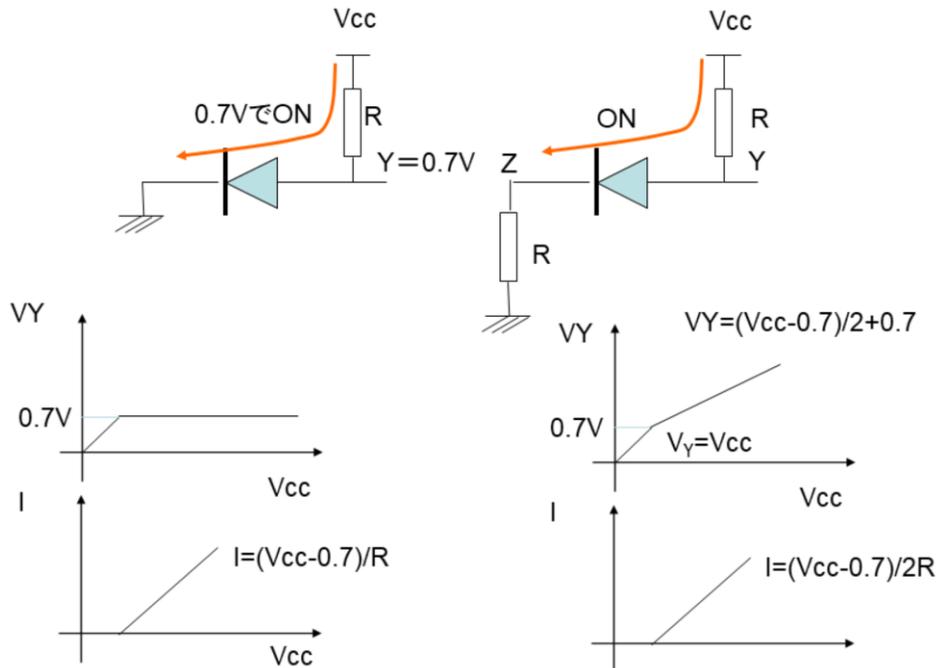
グラフで書くと、ダイオードの電流、電圧特性は図に示すようになります。ある一定の電圧から急に電圧が流れます。この特性は指数曲線で極めて急峻です。この電圧はpn結合のエネルギー障壁の電圧によって決まり、シリコンでは0.65Vくらいになります。この電圧をダイオードのON電圧と呼びますが、これは実は温度によって、またデバイスによって結構変化します。ここではざっくり0.7Vとしておきます。テキストによっては0.6Vで計算するものもあります。

ダイオードのスイッチングモデル



さて、ここでやや乱暴な仮定をします。ON電圧より低い範囲では、逆方向も含めて電流は0つまりアノードとカソードが切れていると見なします。これがOFFの状態です。アノードとカソードにON電圧以上が掛かると、アノードとカソード間は抵抗0の状態と考えます。これがONの状態です。ダイオードのON状態は実は結構理解しにくいです。ダイオード自身の抵抗は0と考えるので、外部に抵抗をつけないと、無限に電流が流れることとなります。つまり、流れる電流は外部に繋いだ抵抗によって決まります。これは現実世界に対応しています。実際、電源に直接ダイオードを繋いではいけません。電流が流れすぎてしまい、素子を破壊し、電源にもダメージを与える可能性があります。また、電流がダイオードにいくら流れてもアノード、カソード間にはON電圧、すなわち0.7Vが生じます。電流が流れるほど電圧降下が大きくなる抵抗とはこの点が違います。

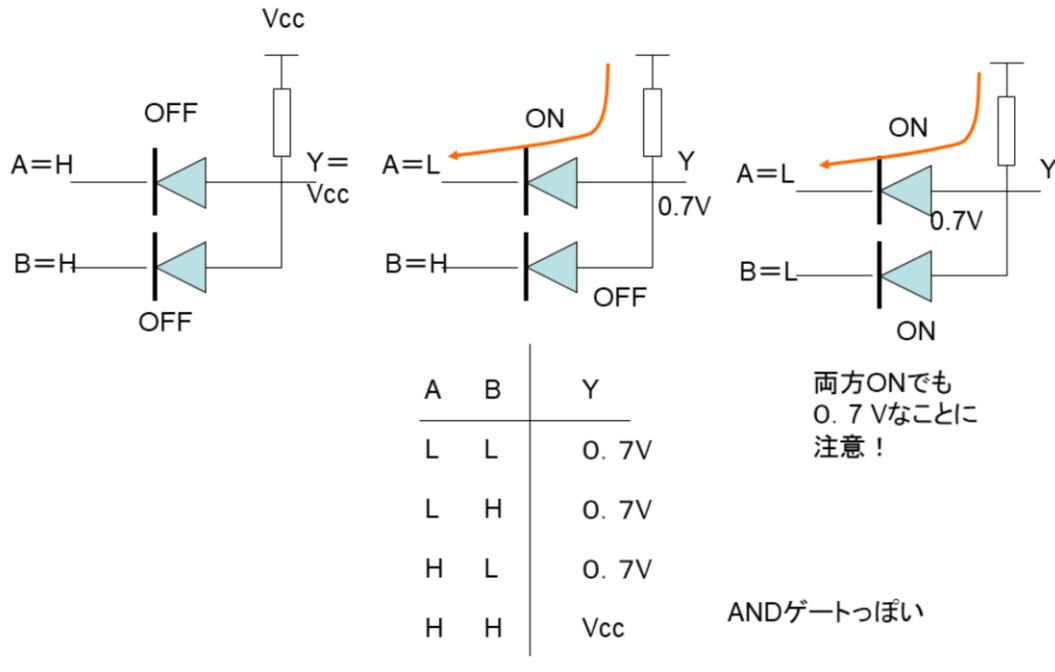
電流が流れれば0.7V低下する



例えば、抵抗とダイオードを繋いでカソードをグラウンドに落としたとしましょう。横軸に電源電圧、縦軸にY点の電圧と電流を取ったグラフを示します。まず、ON電圧に達するまで、ダイオードはOFFです。つまり切れてる、ないのと同じです。このため、Y点の電圧は電源電圧がそのまま出力されます。電流は全く流れません。ここで、 V_{cc} が0.7Vを越えるとダイオードはONになり、電流が流れます。流れる電流は抵抗の値で決まりオームの法則にしたがって $(V_{cc}-0.7)/R$ です。Y点の電圧は0.7Vに固定されて動きません。

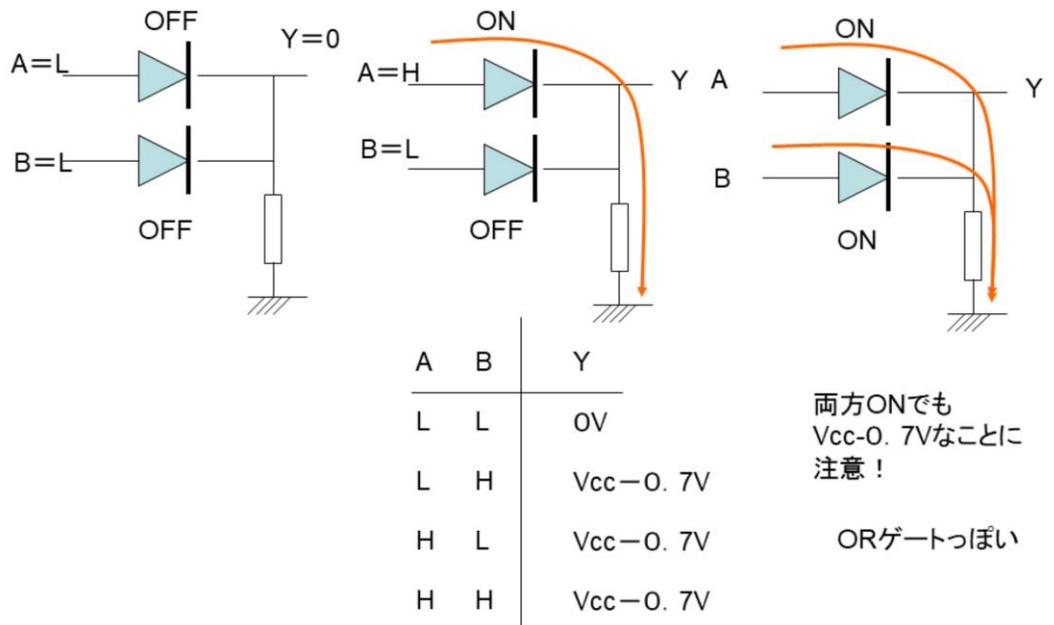
では、カソードからもう一つ抵抗を介してグラウンドに落とすとどうなるでしょう？ V_{cc} が0.7Vより下の場合はダイオードはOFFになり、電流は流れません。回路は切れている、ダイオードはないのと同じと考えられます。このため、電流は0、Y点の電圧は V_{cc} と同じになります。では V_{cc} が0.7Vを越えてダイオードがONになるとどうなるでしょう。ダイオードの両端には0.7Vが生じます。この0.7Vを差し引いた $(V_{cc}-0.7)$ が二つの抵抗で分圧されると考えられます。このため、Y点の電圧は $(V_{cc}-0.7)/2R+0.7$ になり、Z点の電圧は $(V_{cc}-0.7)/2R-0.7$ になります。

ダイオードAND(論理積)



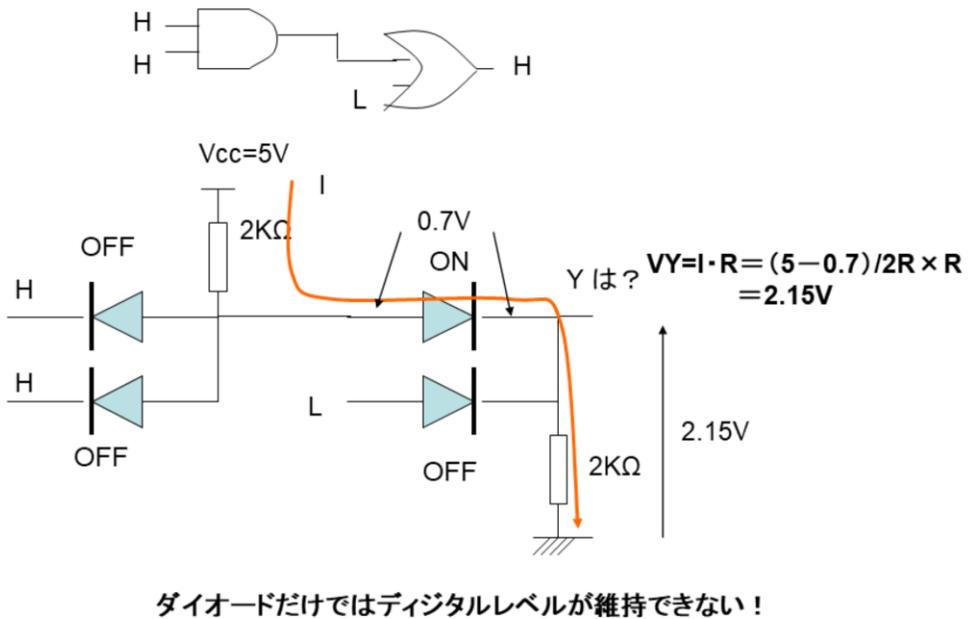
ダイオードを二つ使うと論理積(AND)もどきができます。今、HレベルをVcc、Lレベルを0Vと考えます。AとBの両方をHレベルにすると、ダイオードは両方共OFFで電流が流れません。このためYはVcc、すなわちHレベルになります。では片方がLになるとどうなるでしょう。Lになった入力に繋がっているダイオードがONになって電流が流れます。Y点はON電圧、すなわち0.7Vです。両方の入力がLになっても、Y点は0.7Vです。この場合、電流は両方に分流され、一つがONになった時と同じだけ流れます。0.7Vをだいたい0Vでしだ、と思うと、これは入力が両方共HレベルのときだけHレベルを出力する論理積ゲート、ANDゲートと考えることができます。

ダイオードOR(論理和)



逆方向に繋ぐと、論理和(OR)ゲートもどきができます。この場合は入力が両方Lだと当然ダイオードはOFFでYも0Vです。なにせ回路中に電源がないもので、次にどちらかの入力をHレベル、すなわち電源レベルを繋ぐと、ダイオードはONになってY点は $V_{cc}-0.7V$ になります。先ほどと同じく、両方 V_{cc} を入力しても状況は変わらず、Y点は $V_{cc}-0.7V$ になります。この場合もダイオード1個のときに抵抗に流れる電流の半分が2つのダイオードのそれぞれに流れます。 $V_{cc}-0.7V$ をだいたい V_{cc} つまりHレベルだと思えば、これは入力のどちらかがHレベルのときにHレベルを出力する論理和(OR)ゲートとなります。

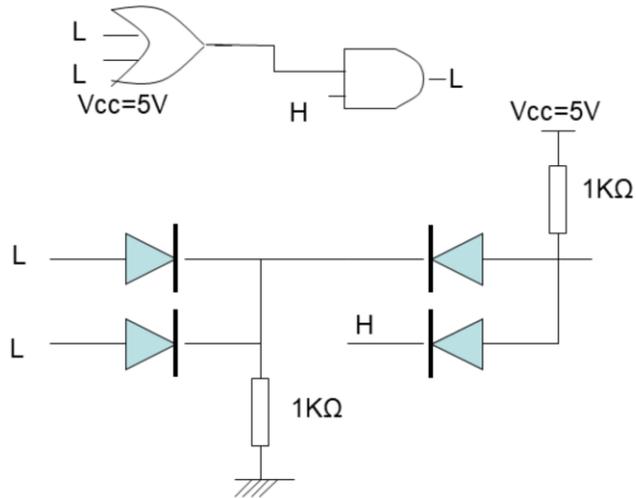
例題1 (p.64)



ではこのANDゲートとORゲートを接続して、図のようなレベルを与えてみましょう。Y点はどうなるでしょうか？図に示すように電流が流れてダイオードの一つがONになります。ここで抵抗が両方共2K Ω であれば、 $(5 - 0.7) / 2 \times 2K = 1.075mA$ 流れます。抵抗がK Ω 台の場合は流れる電流はmA台になります。オームの法則でY点は2.15Vです。ちなみに抵抗の値がいくつであっても、二つの抵抗の値が同じであればここは2.15Vになります。これは5Vに比べるとずいぶん低い値です。つまりダイオードだけではレベルが維持できないことが分かります。後に出てくるトランジスタが必要になります。ANDゲートとORゲートの記号は計算機基礎ですぐ習います。

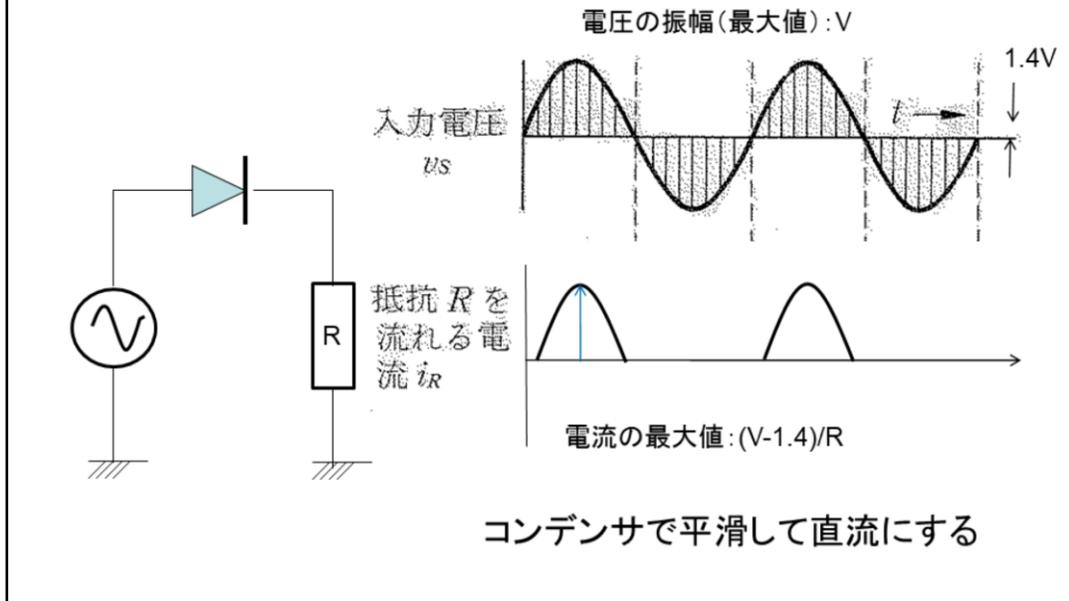
演習1-1

- 下の回路をダイオードANDとダイオードORで構成した。出力は何Vか？



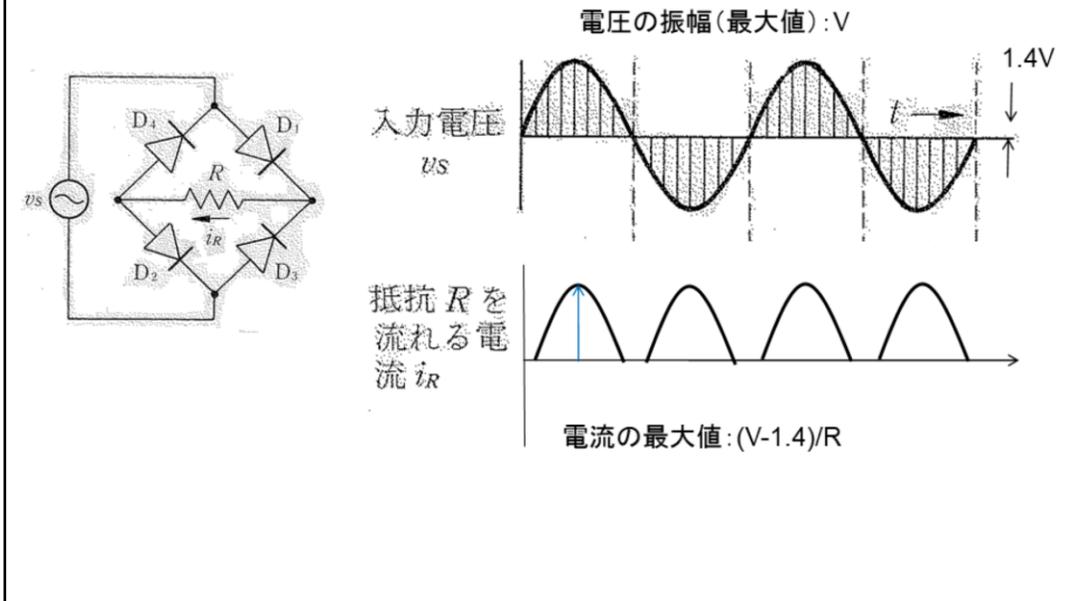
では演習1をやってみましょう。

ダイオードを利用した回路① 整流回路



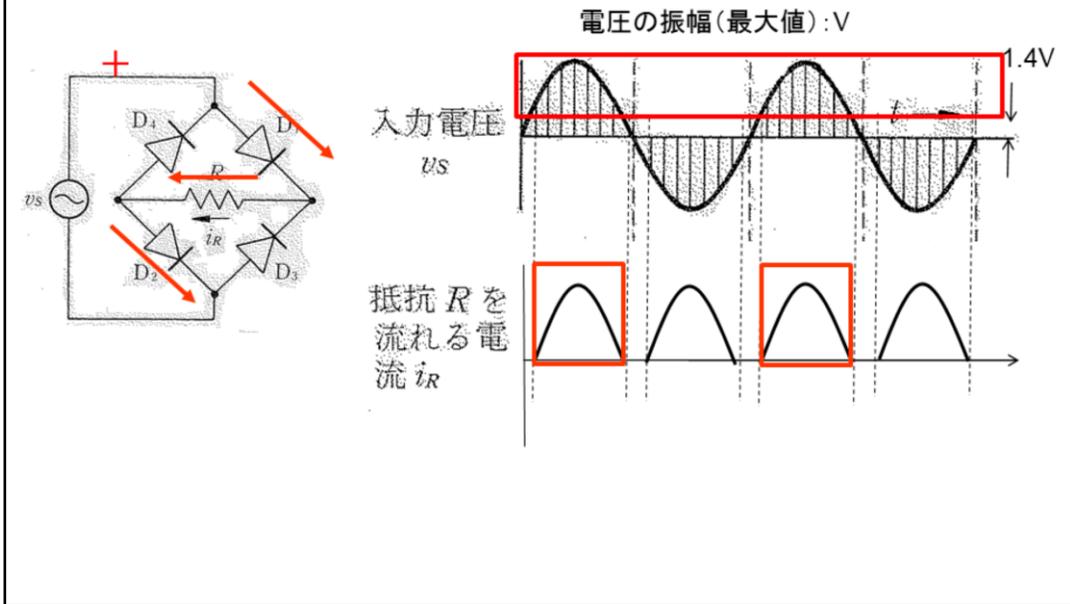
ダイオードを利用した回路をいくつか紹介しましょう。最初に挙げられるのが整流回路です。日本は100Vの交流を商用電源として使っています。これを直流に変換する場合は、ダイオードを一つ使って、マイナス方向の波形を切り落としてしまえば良いです。これをコンデンサで平滑すれば直流を作ることができます。しかし、この方法では交流波形の下半分を有効利用できず、もったいないです。また、電圧が0Vの時間が長く続くので平滑するため容量の大きなコンデンサが必要です。

ブリッジ整流回路



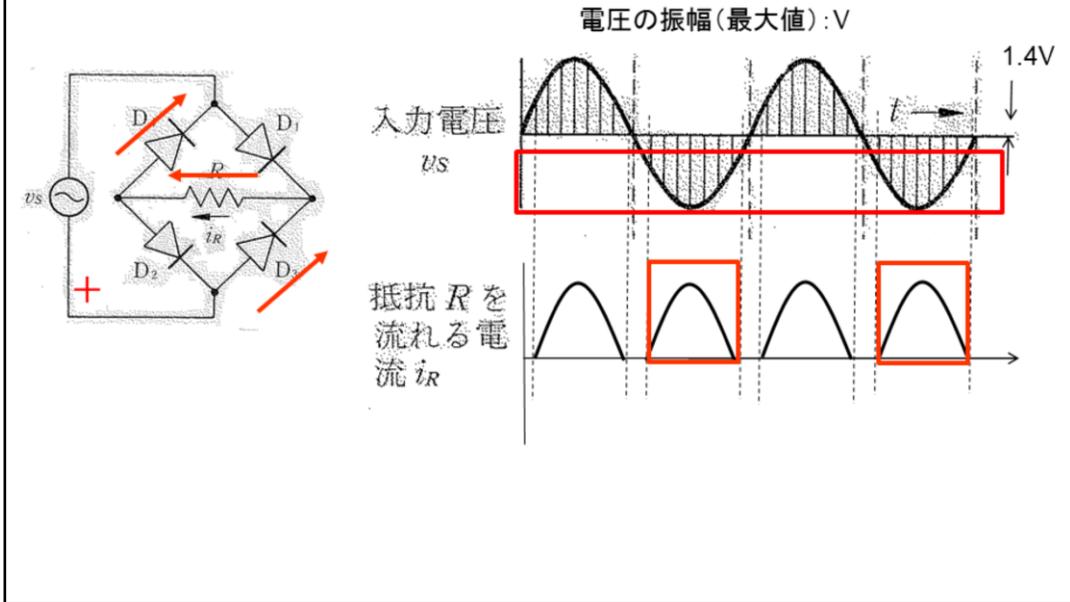
ブリッジ整流回路はこの問題点を解決するための回路です。交流が正のとき D_1 と D_2 が負のときは D_3 と D_4 がONになり、いずれも同じ方向に電流が流れます。抵抗の両端から電圧を取り出すことにより、直流成分を得ることができます。

ブリッジ整流回路の動作 プラス方向



交流が正の方向に振れた場合、 D_1 と D_2 がONになり、抵抗 R に右から左方向に電流が流れます。

ブリッジ整流回路の動作 マイナス方向



一方で、負の方向に振れた場合(つまり下側がプラスになった場合) D_3 と D_4 がONになり、さっきと同じ方向の電流が R に流れます。このようにして、ブリッジ整流回路では正の方向も負の方向も利用することができて有利です。

ダイオードを利用した回路例② リミッタ回路

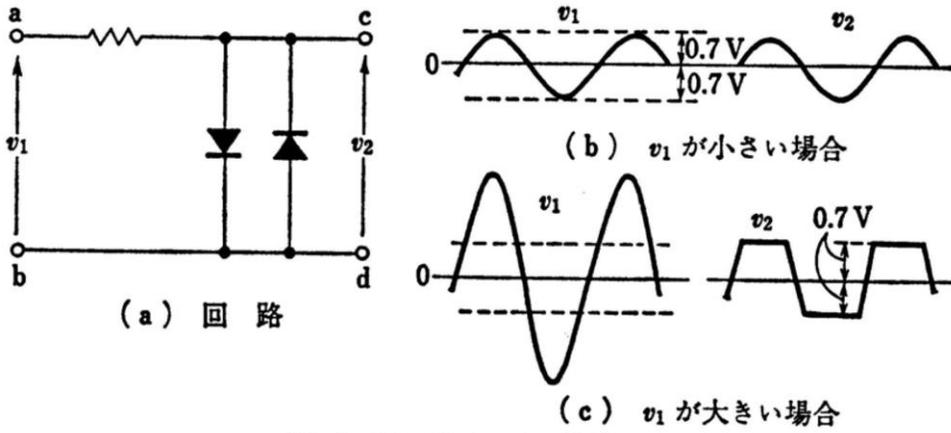
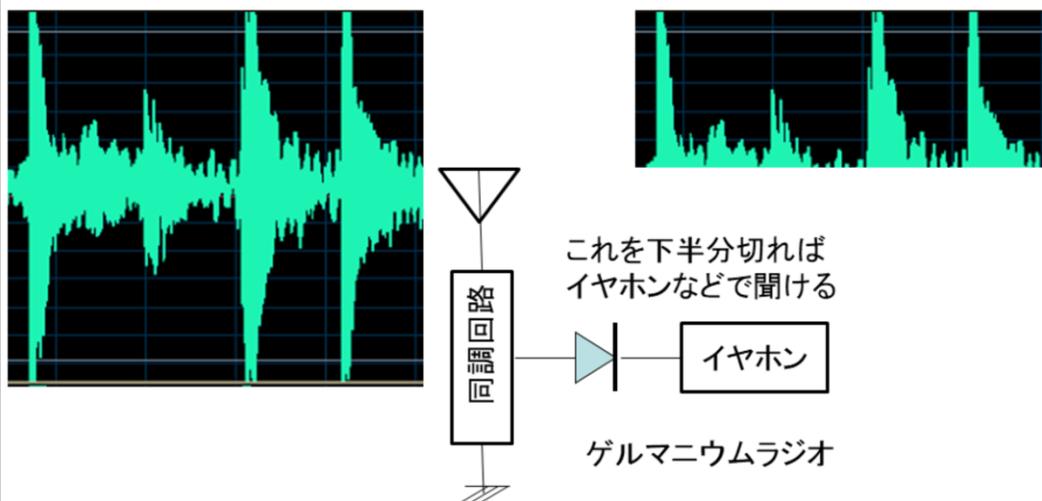


図 1・11 リミッタ (II)

ダイオードは0.7VまではOFFで切れており、0.7Vを越すとONになる性質を利用した回路がリミッタです。上の回路の出力は0.7Vでちょん切れてしまいます。

ダイオードを利用した回路③ 検波

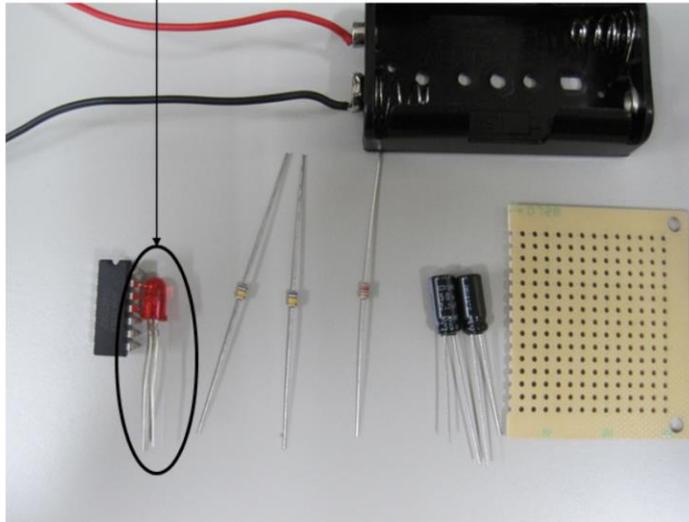
AM変調の電波をコイルで受信すると両側に
波形が生じる



ダイオードのもう一つの役割として検波というのが挙げられます。ゲルマニウムラジオをご存じでしょうか？アンテナからコイルで取り出されたAM変調の電波は両側に音声波形が表れます。この下半分をダイオードで切ってしまうとこれをセラミックイヤホンに繋ぐと、AM放送を聞くことができます。この場合、今まで想定してきたシリコンダイオードと異なりON電圧の低いゲルマニウムダイオードが使われます。

身の回りのダイオード

- LED(Light Emitting Diode:発光ダイオード)



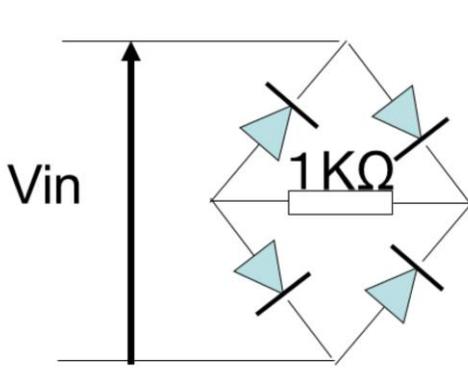
皆さんが身の回りで見かけることがあるのは発光ダイオードLEDが多いです。

発光ダイオード

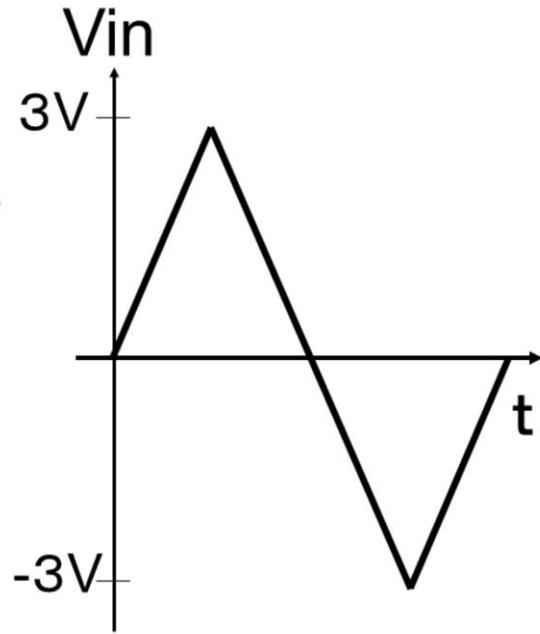
- 順方向電流を流すことで発光
- 通常のダイオードよりON電圧が高い
2.1V-3.5V
- 赤が一番簡単で安い、黄、緑、青の順に難しくなり、高くなる
- 高輝度青色発光ダイオードの発明に対するノーベル賞受賞の発明の話は有名だよ！
- 発光ダイオードを明るく光らせるためにはどうすればよいか？
- 発光ダイオードを直接電源につないだらどうなるか？

発光ダイオードは順方向電流を流すことで発光します。赤から順に色が青方向に行くほど発光が難しくなり、青色発光ダイオードが一番難しいです。この発明者がノーベル賞を受賞したので、皆さんも良くご存知だと思います。発光ダイオードは電流を流せば流すほど明るく輝きますが、直接電源に繋ぐと流れすぎてしまうので、抵抗の値を調整して輝度を調整します。

演習1-2



V_{in} の入力に対する
抵抗の両端の
電圧を求めよ
(最大値を書くこと)



今日のポイント

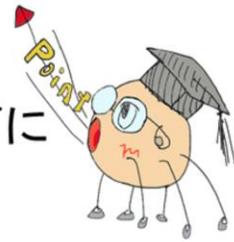
1. ダイオードはアノード、カソード間がON電圧(0.7V)を越えるとON

- ON時は、外部の抵抗で電流が決まる。
- 電流の流れに関わらず両端は0.7V

それ以外はOFF

- アノード、カソード間は電氣的に切れている

2. ダイオードはリミッタ、整流、検波などに使われる



インフォ丸がまとめた今日のポイントはこの2つです。