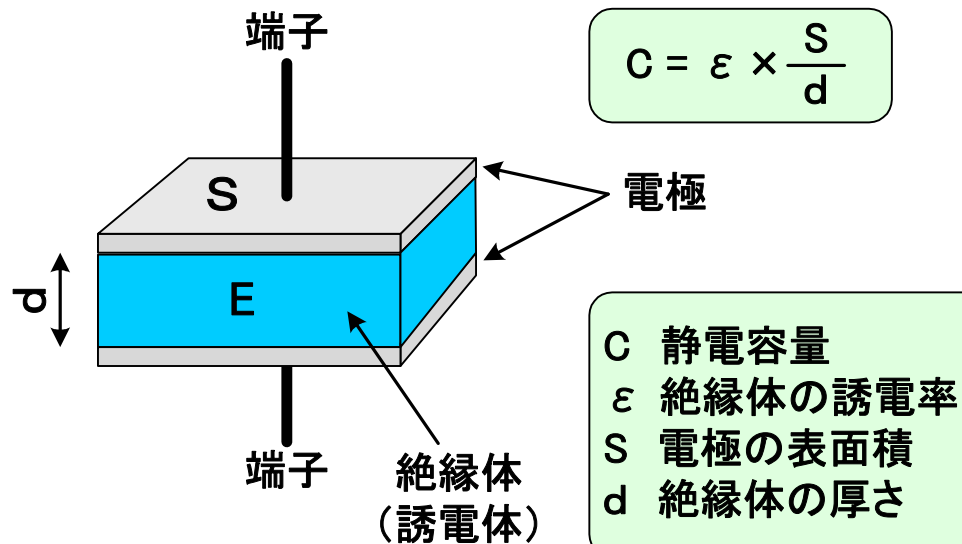


コンデンサの基本モデル

電子工作の基礎、今回は、コンデンサです。あまり難しい話はしたくないのですが、コンデンサの場合、避ける事が出来ない構造、原理的な話と、それに伴う数式があり、分かりにくいかもしれませんが、お付き合い下さい。



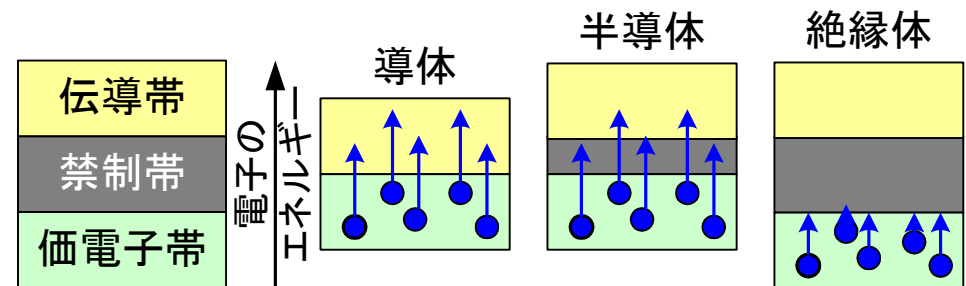
コンデンサは、簡単に言うと、電気を貯める事ができ、貯めた電気を必要な時に放出することが、出来る部品です。蓄積できる電気(電荷)は電池と比較すると少ないので、電荷の放出(放電)においては短時間しか電流を供給出来ませんが充電と放電は、短時間に繰り返す事が出来ます。

コンデンサの基本モデルを、左図で示します。絶縁体(誘電体)を金属板(電極)で挟んだ物がコンデンサです。その金属板(電極)間に直流電圧を印加すると電荷を蓄積します。これが、コンデンサの蓄電原理です。蓄えられる電荷の量を静電容量と言い、静電容量Cは、絶縁体の誘電率ε、電極の表面積S、絶縁体の厚さdで決まります。静電容量Cは、絶縁体の誘電率εを大きくする、電極の表面積Sを大きくする、絶縁体の厚みdを薄くすることで大きくする事が出来ます。その関係を数式で表したものが、 $C = \epsilon \times S/d$ です。

電極の表面積 S 、絶縁体の厚さ d は、イメージしやすいですが、誘電体とか 誘電率 ϵ は、私も 原理的な事は、よく分かりません。

改めて誘電体について調べてみると、誘電体とは、導電性よりも誘電性が 優位な物質である。 広いバンドギャップを有し、直流電圧に対しては電気を通さない絶縁体としてふるまう。 身近に見られる誘電体の例として、多くのプラスチック、セラミックス、雲母(マイカ)、油などがある。 誘電体は電子機器の絶縁材料、コンデンサの電極間挿入材料、半導体素子のゲート絶縁膜などにもちいられている。 また、高い誘電率を有することは光学材料として極めて重要であり、光ファイバー、レンズの光学コーティング、非線形光学素子などに用いられている。 と、あります。

左にバンドギャップという言葉が出てきましたが原子あるいは分子間で、価電子が移動出来ない場所を バンドギャップというようです。 電気をよく通す金属類では、バンドギャップは、無いといえます。 バンドギャップの大きい絶縁体は、価電子が 移動出来ないため、電流が流れません。 半導体は、その中間にあります。



このバンドギャップという帯域は、半導体において、有効に利用されています。

半導体に 3価や5価の不純物を僅かに混ぜる事で、電子や、正孔の流れを 制御する事が出来ます。

誘電体の分類

誘電体には、最も基本的な常誘電体及び圧電体、集電体、強誘電体の全 4 種類に分類され、以下のような性質を示す。

尚、強誘電体は、これら全ての特徴を兼ね備え 集電体は 圧電体、常誘電体の性質を示すなど、上記の図のような関係にある。

常誘電体：

強誘電体以外の事をいう。

圧電体：

応力を加える事により分極（及び電圧）が生じる誘電体を圧電体と呼ぶ。また、電圧を印加する事で応力及び変形が生じる。これらの性質は圧電性と呼ばれ、ソナーなどに利用されている。

強誘電体

集電体

圧電体

誘電体

集電体：

圧電体のうち、外から電界を与えなくても自発的な分極を有している物を 特に集電体と呼ぶ。微小な温度変化に応じて誘導分極（及びそれによる起電力）が生じる性質が名称の由来である。この性質は、赤外線センサなどに応用されている。

強誘電体：

集電体のうち、これを外部からの電界によって方向を反転させる事が出来る物を強誘電体と呼ぶ。強誘電体の特徴として、分極が 外部電場に対するヒステリシス特性を有する事が挙げられる。この特性は不揮発性メモリの1種であるFe RAMに応用されている。

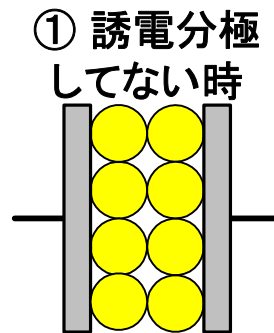
余談ですが、集電体(赤外線センサ)や 圧電体(ピエゾ素子)が 誘電体の一部になるとは、知りませんでした。

誘電分極

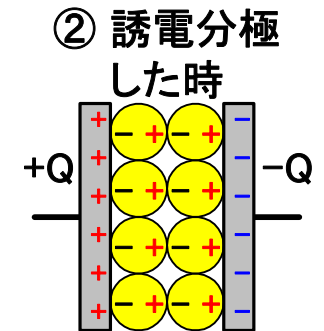
誘電分極とは、誘電体(絶縁体)に外部電場をかけた時に、その誘電体が電氣的に分極する現象の事。電気分極とも言われる。

電場によって微視的な電気双極子が整列する事で引き起こされる。正負の電荷の組が、無数に並んでいる状態であるため、内部にも電位差が生じている。よく似た現象に静電誘導があり、こちらは導体の場合に起きる現象である。

① は 誘電分極していない状態で、外部電界がないので微視的な電気双極子が、中和状態で全体としては、両極間に電位差は発生していない状態。



② は 外部から電場を印加して誘電分極した状態で、微視的な電気双極子が、整列しており全体としては、両極間に電位差が生じている。



自由電子の無い不導体では電荷が移動出来ないため、その表面に電荷が生じるなどあり得ない現象のようにも思えるが、実際には、分子自体が電荷の偏りを持っていて(極性分子)これが整列したり、あるいは分子内の中で電子がプラス側に偏るため、引き起こされる。

これらの説明を読むと、永久磁石が原子の磁気モメントを 整列させた状態にあるのと、似てますね。

磁石は、一旦磁化すると 簡単には 消えませんがキュリー温度より高い温度にすると、磁性は 消えます。

誘電率、比誘電率

誘電率とは、2枚の電極に挟まれた絶縁体(誘電体)の 誘電分極のしやすさです。

誘電分極しやすい物質は ϵ の値が 大きくなり
それに伴って C の値が 大きくなります。

C が大きいという事は、コンデンサーとしての性能が高い、**たくさんの電荷を貯められる**、ということです。

真空の 誘電率(ϵ_0)は、

$\epsilon_0 \doteq 8.85 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$ です。

(8.85 より正確な値は、8.85418782 です。)

誘電率(ϵ)は 物質(誘電体)によって様々な値を取るのですが **通常その値は用いられません**。

各誘電体の誘電率は 真空の誘電率 ϵ_0 との比で 表します。

それを **比誘電率(ϵ_r)**と いいます。

よって、誘電率 ϵ を 求めるには

誘電率 $\epsilon = \text{真空の誘電率 } \epsilon_0 \times \text{比誘電率 } \epsilon_r$
となります。

↑
各誘電体 固有の
誘電比率

因みに、比誘電率は、必ず 1以上の値になります。 $\epsilon_r > \epsilon_0$ となります。

各材質における比誘電率の 例：

空気：	1.000586
ガラス・エポキシ積層板：	4.5 ～ 5.2
ダイヤモンド：	16.5
二酸化チタン：	100
陶器類：	5.0 ～ 7.0
ポリエチレンテレフタレート：	2.9 ～ 3.0
ポリエステルペレット：	3.2
水晶：	4.6
雲母：	4.5 ～ 7.5

コンデンサの 静電容量

誘電体、誘電率の話で、だいぶ遠回りになりましたが、最初のページの 静電容量の式に戻ります。

$$C = \varepsilon \times \frac{S}{d}$$

C	静電容量	[F]
ε	絶縁体の誘電率	[F/m]
S	電極の表面積	[m ²]
d	絶縁体の厚さ	[m]

実際に計算しようとなると、単位が、はっきりしていないと計算出来ないので、付けておきました。 仮に、値を入れて計算してみます。

誘電体に雲母(ε_r) = 7.0

電極のサイズ = 100 × 100mm

厚さ = 0.1mm として計算してみます。

電極の面積: $0.1 \times 0.1 = 0.01$ [m²]

厚さ: 0.0001 [m]

$\varepsilon_0 \doteq 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]

ε は、 $\varepsilon_0 \times \varepsilon_r$ なので、
 $\varepsilon = 8.85 \times 10^{-12} \times 7.0 \doteq 6.2 \times 10^{-11}$

になります。 左の $C =$ の 式に代入すると

$C = 6.2 \times 10^{-11} \times 0.01 / 0.0001$ は
 $= 6.2 \times 10^{-11-2+4}$
 $= 6.2 \times 10^{-9}$ で、 $C = 0.0062[\mu F]$ または
 $C = 6200[pF]$ という事になります。

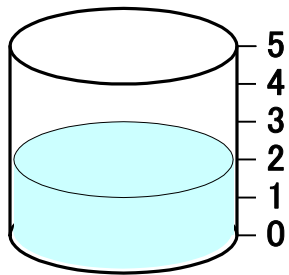
10^{-9} の ナノ という単位を使えば、6.2[nF] という表現も出来ますが、コンデンサの容量表示の補助単位としては、 μF か pF の どちらかを使うのが、一般的です。

コンデンサが、蓄える電荷の計算

$$Q = C \times V$$

Q: 電荷(電気量) [C] クーロン
C: 静電容量 [F] ファラッド
V: 電圧 [V] ボルト

直流印加時、コンデンサが蓄える電荷量の計算は、静電容量 C と、加える電圧の掛け算です。電荷は、円筒形の器に水を貯めるイメージで表現すると以下ようになります。



器の底面積: 静電容量 C
器内の水の水位: 電圧 V
器内の水量: 電荷量 Q
仮に $C=1000\mu\text{F}$ 、 $V=2$ と
すると、 $Q = 0.001 \times 2$ で
 $0.002[\text{Q}]$ クーロンとなります。

因みに、1クーロンの電荷量を、流れる電流で表すと、1Aの電流を、1秒間流した時の電荷量が、1クーロンです。

数式で表すと

$$C = A \cdot s$$

C: 電荷量 [C]
A: 電流 [A]
s: 秒 [sec]

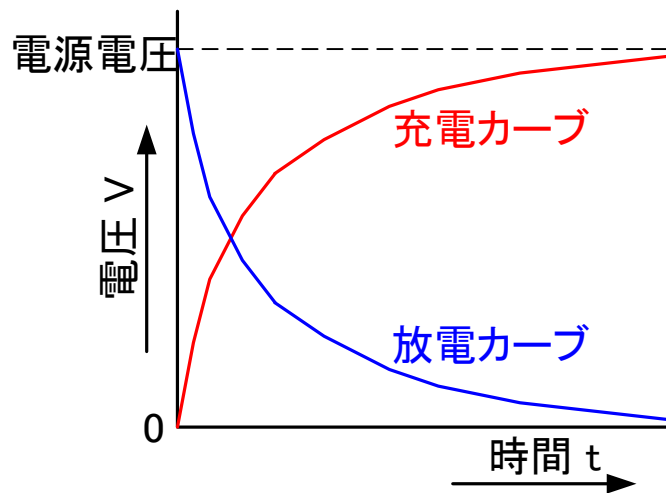
例えば、バッテリーの電荷管理で流れる電流の量と、方向を電流センサで常時計り、流れる電荷の流入、流出を計る事が出来ます。

因みに、左の器の図では、目盛が5までしか付いていません。水をそれ以上入れると水があふれます。それをコンデンサに置き換えると、**コンデンサの耐圧を超えて電圧を印加する事になり、コンデンサがパンクする事になります。**危険ですのでやらないように注意して下さい。

コンデンサの基本性質 ① 電荷を蓄える

コンデンサは蓄電器とも呼ばれるように、広い面積の電極構造と誘電率の高い誘電体を用いる事で、大量の電荷を蓄える事ができます。

電源から直流電圧を加えると、導線に瞬間的に電流が流れてコンデンサを充電し、電極間の電位差が電源電圧と等しくなると電流は流れなくなって充電は終了します。充放電過程の電圧は、下のようなグラフとなります。



充電過程:

電圧が加えられた瞬間、大電流が流れ、電荷が蓄えられるにつれ、電流は小さくなり、 $Q=CV$ になると電流はゼロになる。

放電過程:

充電されたコンデンサを放電すると瞬間的に大電流が流れ、しだいに減少してゼロになる。

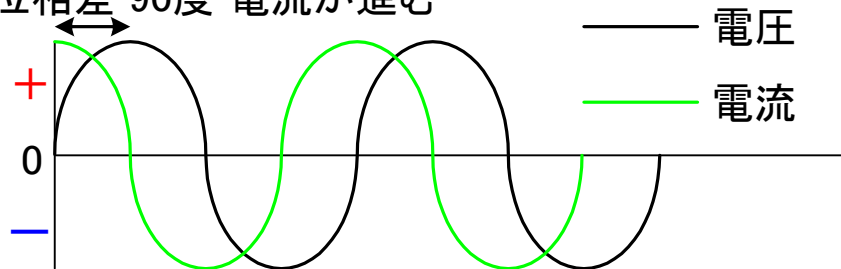
コンデンサの基本性質 ②

直流を遮断し、交流を通過させる

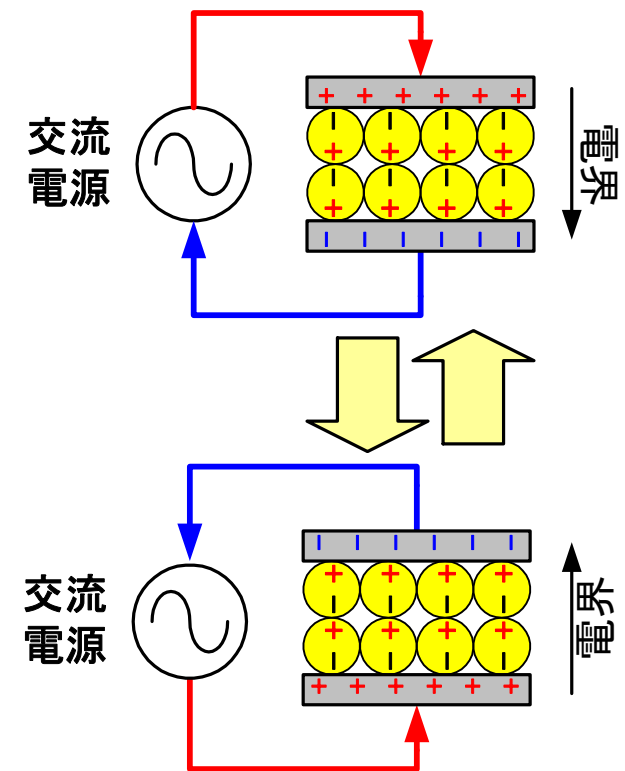
コンデンサの電極は誘電体によって隔てられているので直流電圧を加えると充電過程で瞬間的に電流は流れますが、**誘電体の内部には電流が流れません**。つまり、**コンデンサは直流を遮断する性質があります**。交流電源につなぐと、電極板は周期的に充電と放電を繰り返し、電界方向もそのつど反転します。**絶縁体内部で電子の移動が起きているわけではありませんが、実質的に交流電流が流れているのと同等**であり、このため**コンデンサは交流電流を通過させるとみなせます**。通常の電流(伝導電流)に対して、この電流を**変位電流**といいます。

< 正弦波交流の電圧波形と電流波形 >

位相差 90度 電流が進む



交流電源により、対抗する電極は交互に充放電を繰り返し、電界方向もそのつど反転する。



コンデンサの基本性質 ③

周波数が高い交流ほど通しやすく
静電容量が大きいほど通しやすい

直流を遮断し、交流を通過させるのはコンデンサの基本性質です。しかし、どの交流も同じように通過させるわけではなく、通過のしやすさ、あるいは通過のしにくさは交流の周波数やコンデンサの静電容量によって決まります。

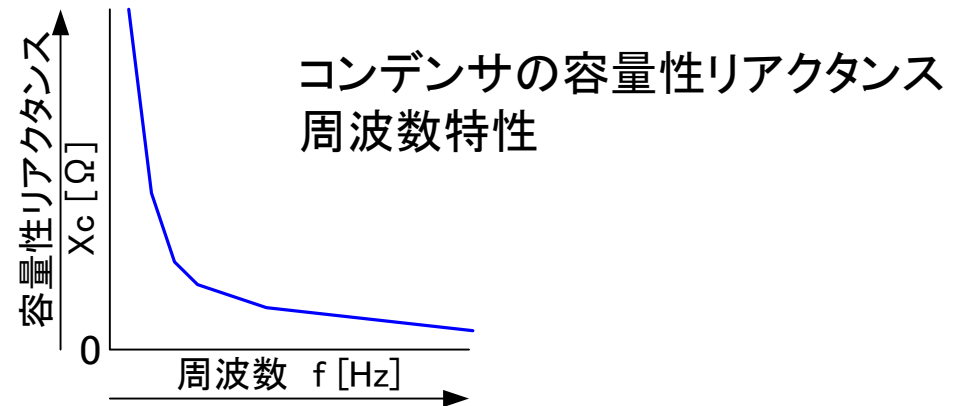
後者の 交流通過のしにくさを 容量性リアクタンス(X_c)といいます。交流に対するコンデンサの抵抗であり、単位は オーム $[\Omega]$ です。

コンデンサの 容量性リアクタンス(X_c) は、次の式で表されます。

< コンデンサの容量性リアクタンス(X_c) >

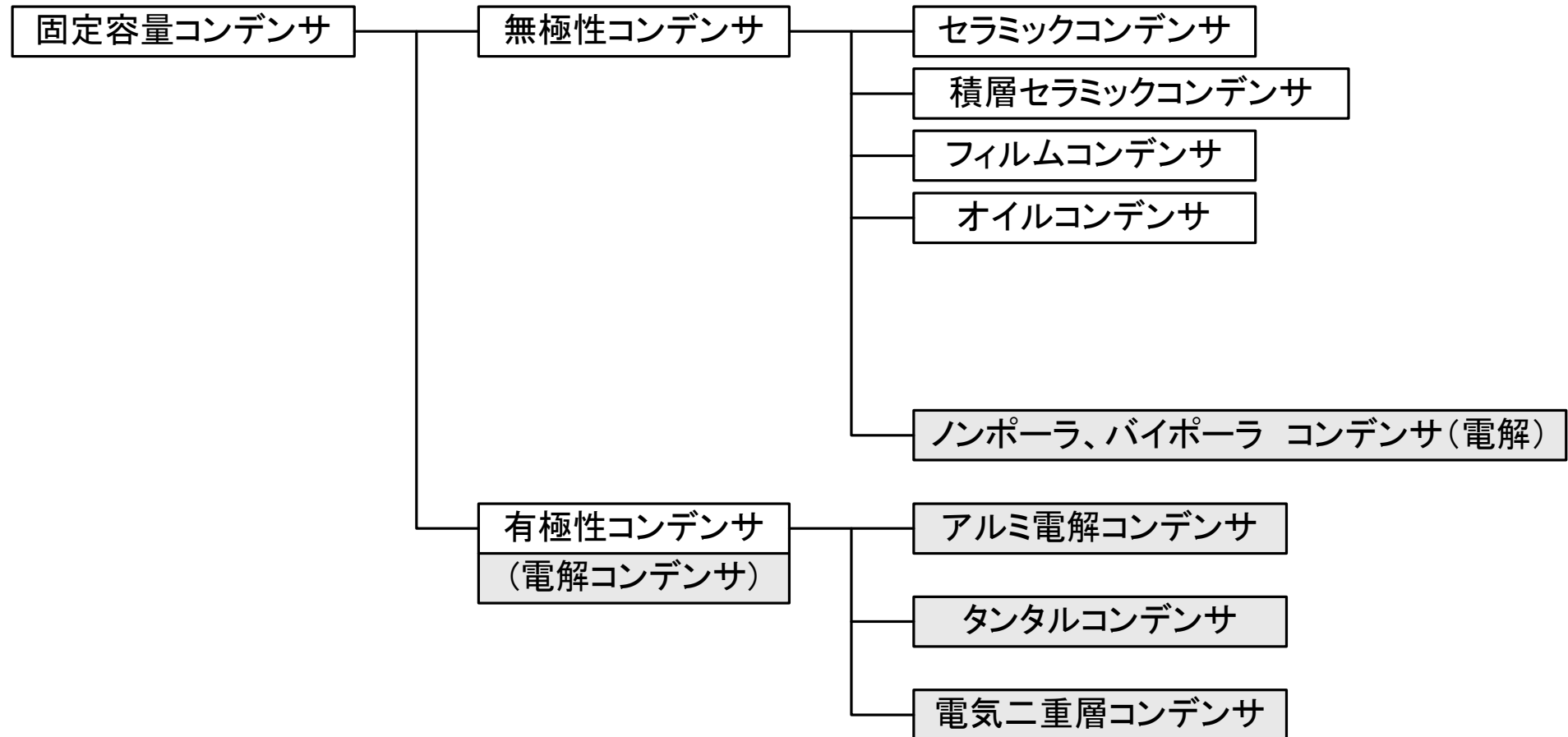
$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C} \quad [\Omega]$$

f: 周波数 [Hz] ヘルツ
C: 静電容量 [F] ファラッド
 $\omega: 2\pi f$



コンデンサは、直流を遮断し 交流を通過させる。周波数が高い交流ほど 通しやすく、静電容量が大きいほど 通しやすい。

コンデンサの種類



セラミックコンデンサ

セラミック(陶磁器)を、誘電体に使用したコンデンサです。 最大で、0.1 [μ F]で 小容量の物が大半です。 ちなみに、背景の 青い色の方眼目盛は、5mmです。 このタイプのセラミックコンデンサは、原理図通りの 2枚の円盤状の電極板で、セラミックを挟んだ形になっています。 この画像の物は、耐圧 50[V]です。

15[pF]



20[pF]



30[pF]



100[pF]



220[pF]



0.01[μ F]



積層セラミックコンデンサ

通常のセラミックコンデンサより、大容量の物が作れます。左 2 つが、1608 のチップタイプのコンデンサです。このチップコンデンサには、小さいせいか、容量表示がありません。
(こぼすと大変です。)

0.1[μ F]



1[μ F]



104 0.1[μ F]



155 1.5[μ F]



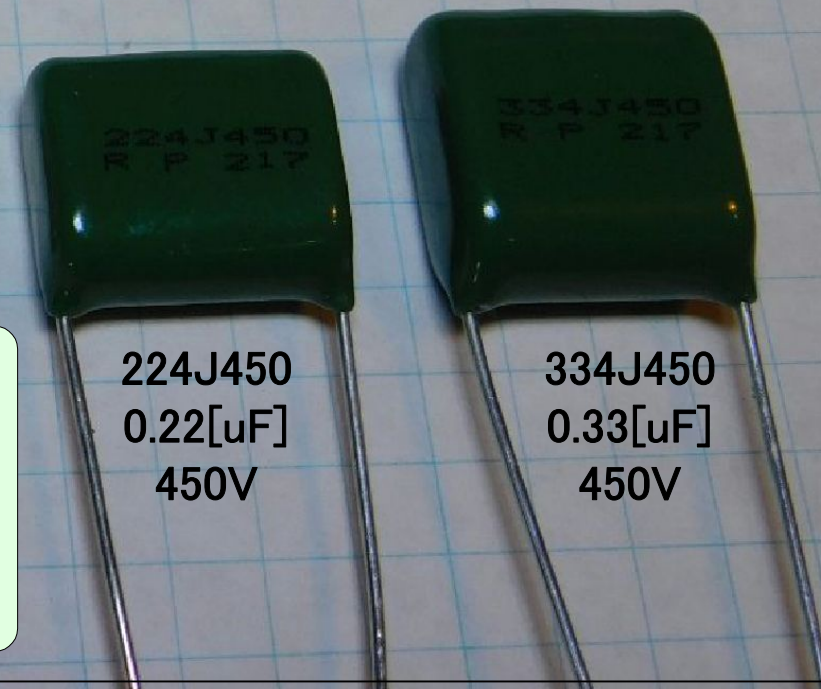
右 2 つが、ラジアルリードタイプです。
104の方が 2.54 ピッチ、155の方が 5.08 ピッチです。

フィルム コンデンサ

アルミ箔の細長い電極と、プラスチックの細長いフィルムを、+電極、フィルム、-電極、フィルムを 巻き込んだ作りになっています。ここにあるコンデンサは、Jで、 $\pm 5\%$ ぐらいの容量精度です。比較的 温度に対する安定度も、高いです。左 5個のコンデンサは、50V耐圧 右 2個のコンデンサは、450V耐圧です。



フィルムコンデンサは、プラスチックフィルムが、誘電体なので、ハンダごて等の高温に 弱いです。その関係で、熱がもろ伝わってくるチップタイプの物はあまり無いようです。一部高温に耐えるフィルムがあるようですが、値段が 高いらしいです。



電解 コンデンサ

電解コンデンサは、表面にエッチング処理を行ったアルミ箔を 2枚用意して、陽極側だけ酸化アルミ処理を行い、電解液を染み込ませた紙を挟んで巻き込んだ物です。

その関係で、足ピンに＋、－の極性があります。

50V
10[μ F]

50V
33[μ F]

25V
1000[μ F]

50V 4700[μ F]

電解コンデンサの特長は、大きさの割に 容量が大きい事です。特に大容量の物が作れます。汎用品は、高周波特性は、あまりよくないと思います。汎用品の、小容量電解コンデンサを、オーディオ回路のカプリング用途に使うのは適しません。経年劣化でホワイトノイズが、目立ってきます。

タンタルコンデンサ

タンタルコンデンサは、見た目は電解コンデンサとは思えないですが、足ピンに、+、-の極性があります。このコンデンサは、オーディオ回路のカプリングに使えます。オーディオ用途であれば、十分な周波数特性を持ち、ノイズレベルも 十分低いです。

今 家には、この一種類しか なかったです。

16V
10[uF]



無極性電解コンデンサ

電極構造は、通常の電解コンデンサ陽極にだけ、酸化被膜を構成しますが、無極性のものは、陽極、陰極の両方に酸化被膜を構成します。容量の割に、形状が、やや大きいですね。

ノンポーラコンデンサ、またはバイポーラコンデンサと呼ばれる 足ピンに、+、- の極性のない電解コンデンサです。BPと書いてあるのが、無極性を意味してます。このコンデンサは、ニチコンの ミューズと呼ばれるオーディオ用途のコンデンサです。

25V
10[uF]

25V
22[uF]

25V
220[uF]

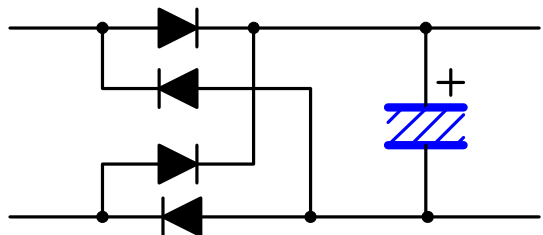
50V
330[uF]

25V
47[uF]

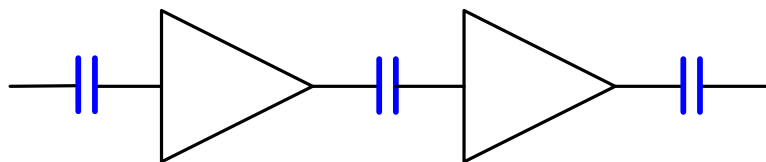


各種コンデンサの用途

大容量コンデンサの用途としては、やはり整流後の平滑回路と思います。

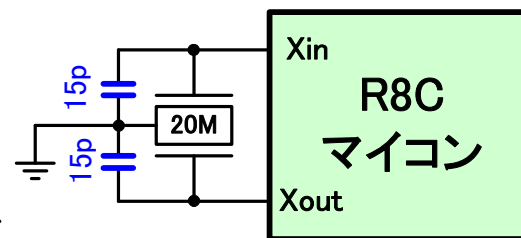


オーディオ用のカップリング用途では、トランジスタアンプ等の電圧が低い場合は、タンタルコンデンサ、積層セラミックでも良さそうな気がします。真空管アンプの場合は、オイルコンデンサ、または耐圧の高いフィルムコンデンサという事になります。



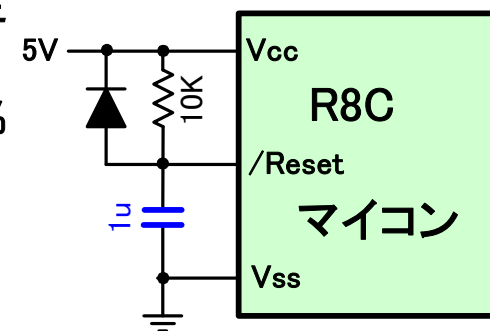
pFオーダー小容量のセラミックコンデンサの場合、高周波回路及びノイズ対策が、考えられます。マイコンのクロック信号生成用の水晶発振子には、小容量のセラミックコンデンサを、2個付けます。私は、R8Cマイコンに20MHzの水晶を付ける場合、15pFを2個使用してます。

ついでに、R8CマイコンのパワーONリセット回路には、RCの積分回路を使用してます。



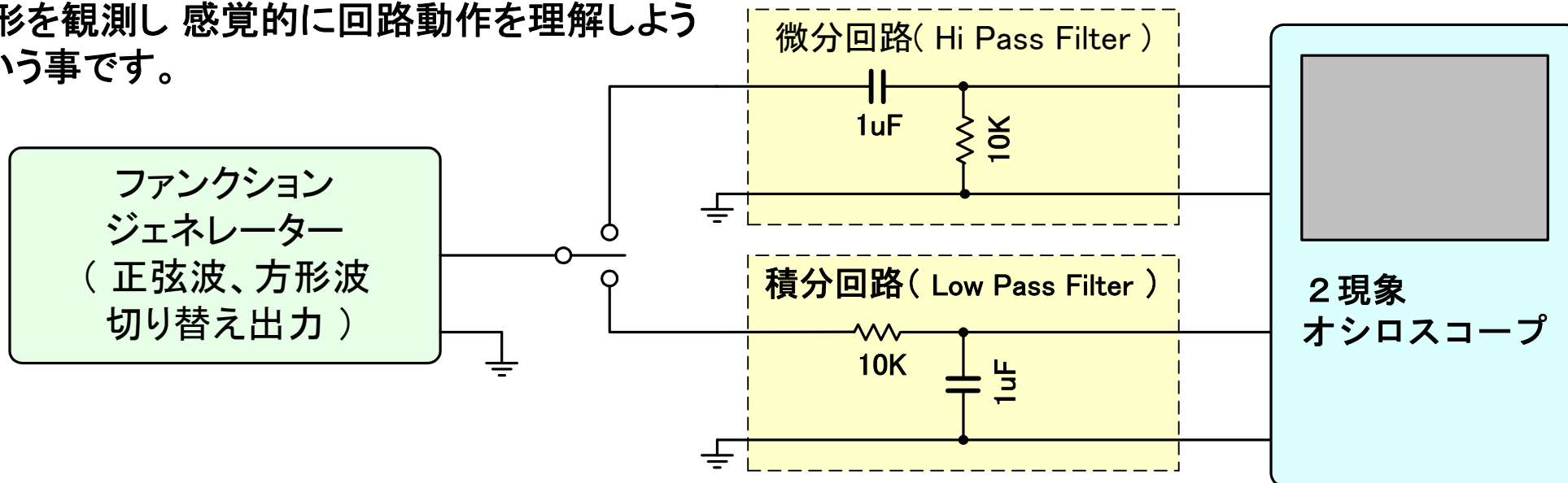
10[KΩ]と、1[uF]で時定数10[ms]ですが、その時点で電源電圧の62.3%まで電圧が上がります。

10Kとパラっているダイオードの役目は、考えてみてください。



抵抗とコンデンサで、微分回路と積分回路の、簡単な実験を行う

微分、積分という言葉を知ると、難しそうに聞こえますが、抵抗とコンデンサで、構成される微分回路、積分回路を用意して、ファンクションジェネレータで、信号を入力し、入力と、微分回路、積分回路の出力を、オシロスコープで、2現象観測して、微分回路、積分回路の、応答波形を観測し、感覚的に回路動作を理解しようという事です。



- ① 直流の過度応答: ?
ゆっくりした方形波を 入力して、過度応答を 確認する。
時定数を変えて違いを確認する。
- ② 交流の応答確認:
いくつかの周波数の正弦波を 入力して出力波形を 確認する。
時定数を変えて違いを確認する。

実験の項目を、検討する

FG(ファンクションジェネレータ)出力レベルは **0 ~ 5V**で 信号出力させる事に する。

抵抗とコンデンサの 10[KΩ]と 1[uF]を、デフォルト値とする。時定数は **$R \times C$** なので 10000×0.000001 で **10[ms]** となる。時定数の変更は、抵抗の方を変更して 対応する。10[KΩ] → 5[KΩ] → 2[KΩ] → 1[KΩ] と 変更する。時定数は、10ms、5ms、2ms、1msに なる。直流の過度応答の FG出力は 10msの 10倍長い 100msを 半周期とする方形波を出力する。100mを 半周期とするので、200ms周期で 周波数は 5[Hz]となる。時定数の 抵抗を 1[KΩ]で行う時は、方形波の周波数を 早くした方が、いいかもしれない。あと、10[KΩ]時に、抵抗の両端に小信号ダイオードを、パラ接続する実験も 行う。

交流の応答確認に関しては、デフォルト 10[KΩ] × 1[uF]なので、フィルタと考えると、カットオフ周波数(レベルが -3[dB]下がる)は、

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

で、約 15.9[Hz]となる。

抵抗値を 10K → 5K → 2K → 1K と変化させるなら、対応するカットオフ周波数は、15.9 → 31.8 → 79.5 → 159 Hz となる。

これら実験項目の検討を元に、実験を行う。