

回路設計の最適解 = 技術情報 =
コンデンサの基礎知識



目 次

・ コンデンサの基本構造	.....	1
・ コンデンサの電気用図記号	.....	1
・ コンデンサの電圧と電流	.....	2
・ コンデンサの基本的な使われ方	.....	3
・ コンデンサの特性	.....	5
・ コンデンサの種類	.....	7
・ コンデンサの種類と特徴まとめ	.....	11
・ パナソニックの商品ラインアップ	.....	11

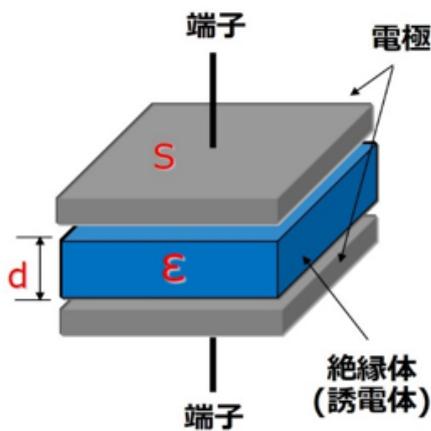
コンデンサの基礎知識

コンデンサは、抵抗、コイルと並ぶ三大受動部品の 1 つです。電気・電子回路には必ず使用されているだけでなく、もしコンデンサがないと回路は正常に動作しません。それは、スマートフォンや IoT 機器、サーバーやネットワーク、そして無線通信システムといった最先端機器でも同様です。また、コンデンサの性能は様々な電子機器の性能に影響を与えることから、非常に重要な部品になっています。

コンデンサの基本構造

コンデンサは簡単に言うと、電気を貯めることができ、貯めた電気を必要な時に放出することができる部品です。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できませんが、充電（電荷の蓄積）と放電は繰り返すことができます。

コンデンサの模式図を示します。絶縁体（誘電体）を金属板（電極）で平行に挟んだものがコンデンサです。その金属板（電極）間に直流電圧を印加すると電荷が蓄積します。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。



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

C : 静電容量
 ϵ : 絶縁体の誘電率
 S : 電極 表面積
 d : 絶縁体の厚さ

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ことができます。

コンデンサの電気用図記号

回路図に用いる電気用図記号は、国際規格 IEC 60617 に記されています。日本でも国際規格と合わせた規格として JIS C 0617 が制定されています（1997,1999）。コンデンサの図記号も一部変更されています。教育の場では新記号に統一されましたが、企業の設計現場などの実情は旧記号が未だに使用されている印象があります。以下は、代表的なコンデンサの記号です。

	新記号	旧 JIS 記号
コンデンサ (極性なし)		
電解コンデンサ (極性有り)		

コンデンサの電圧と電流

コンデンサは、その内部が絶縁されているため直接的な電流の流れはありませんが、印加される電圧の変動により、充電と放電を行うことで、あたかもコンデンサに電流が流れているように見えます。コンデンサに流れる電流の大きさは、電圧の時間的変化が大きいほど大きくなり、次式で示されます。

$$I_c = C \cdot dV_c / dt$$

I_c : コンデンサ電流 (A)

C : 静電容量 (F)

dV_c / dt : V-t 曲線における線の傾き

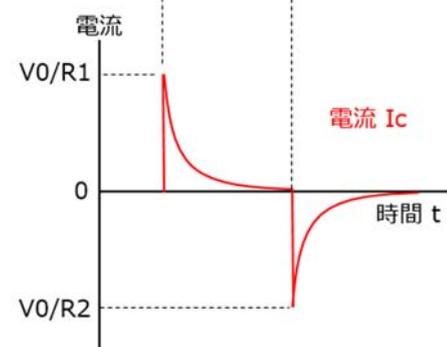
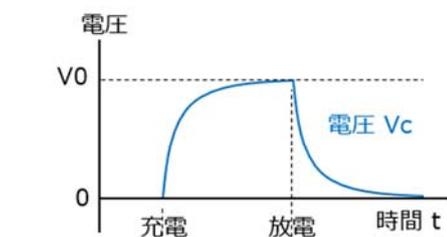
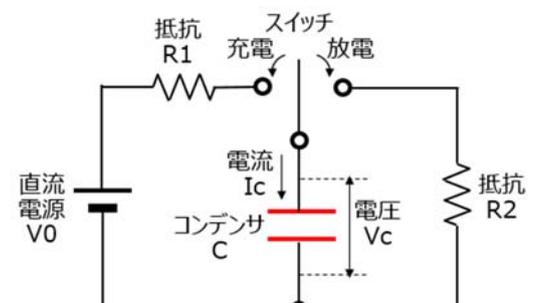
(例 1) 充放電波形の場合

充電されていないコンデンサに抵抗を通じて直流電源からコンデンサに充電させた後、放電させる場合のコンデンサの電圧と電流について説明します。

回路図において、スイッチを充電側に ON すると、コンデンサには V_0 / R_1 のピーク電流が流れ、その後はコンデンサの電圧 V_c が高くなるに従って電流は低くなり、 $V_c = V_0$ となると充電が完了して電流がゼロとなります。

次に、スイッチを放電側に ON すると、コンデンサには V_0 / R_2 のピーク電流が流れ、その後はコンデンサの電圧 V_c が低くなるに従って電流は低くなり、 $V_c = 0$ となると放電が完了して電流がゼロとなります。

ここで理解しておく必要があるのは、コンデンサの電流 I_c の大きさはコンデンサの電圧 V_c の変化の大きさに従うということです。また、スイッチ ON 時には、 V_0 / R の電流が流れますが、ここでもし $R=0$ ならば理論的には無限大の電流が流れて瞬時に充電や放電が完了することになります。



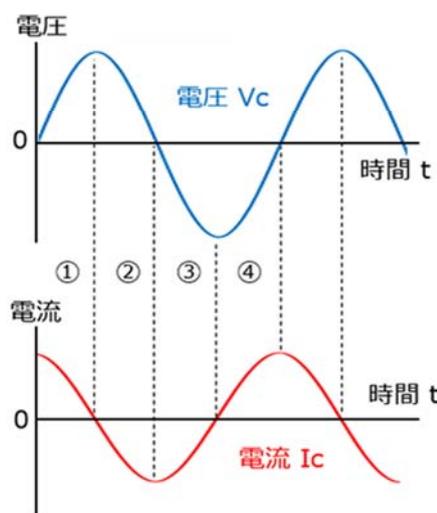
しかし現実にはコンデンサ自体が持っている抵抗成分(ESR)や配線抵抗およびリアクタンス成分の影響があるので、無限大にはなりません、バッテリーと比べて遥かに抵抗成分が小さいため、瞬時の充放電が可能な部品と言えます。

(例 2) 交流波形の場合

コンデンサに交流電圧を印加した場合のコンデンサの電圧と電流について説明します。

例 1 でコンデンサに流れる電流の大きさはコンデンサの電圧の変化の大きさに従うと述べましたが、これは交流波形の場合でも同じです。

- ① まず電圧が 0V から上昇する時に電流は大きく流れますが、電圧の上昇速度が遅くなるに従い電流は低下し、電圧が最大になった時点(電圧の変化がゼロ)で電流はゼロとなります。
- ② 電圧が最大値から下降を始めると、マイナスの電流が流れ始め、電圧がゼロになったポイント(電圧の変化が最大)で電流は最大となります。
- ③ ,④の領域についても上記と同様に考えれば分かると思います。



この電圧と電流の波形を見ると、電圧波形が正弦波であれば、電流波形も正弦波になっており、また電流波形は電圧波形より 1/4 周期前にずれている(電流の位相が 90°進んでいる)ことが分かります。

また、電圧の変化が大きいと大きな電流が流れるということは、電圧の変化が大きい高周波ほど流れる電流が大きくなることも分かると思います。

この時流れる電流(実効値)は次式で示されます。

$$I_c = 2\pi f \cdot C \cdot V_c$$

Ic : コンデンサ電流 (Arms)

π : 円周率 (3.14)

f : 周波数 (Hz)

C : 静電容量 (F)

Vc : 電源電圧 (Vrms)

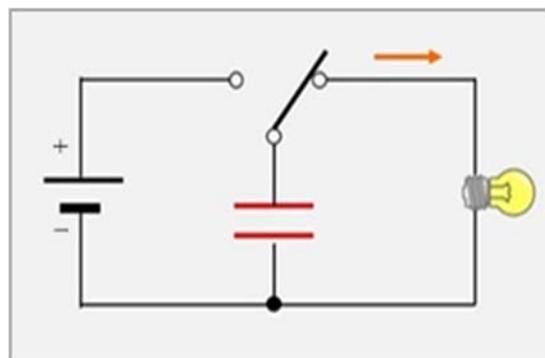
コンデンサの基本的な使い方

前述したように、コンデンサは、①充電と放電が瞬時にできる、②直流は通さないが交流は通す、③交流は周波数が高いほど通しやすい、という性質を持っており、電気回路ではこれらの性質を利用した使い方をします。

代表的な使い方の回路例を示します。

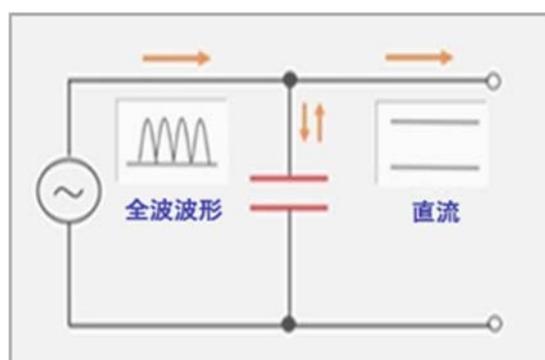
【放電回路】

放電回路はコンデンサに蓄えた電荷を放電させることで接続されている負荷を動作させる回路です。大電流を瞬時に放電できることから、カメラのストロボや、緊急時のバックアップ電源として使用されます。回路例では、スイッチを電源側に接続するとコンデンサは充電され、電源電圧にまで電荷が蓄積すると充電は止まります。スイッチを負荷（電球）側に接続するとコンデンサは放電を開始し、電球は点灯します。



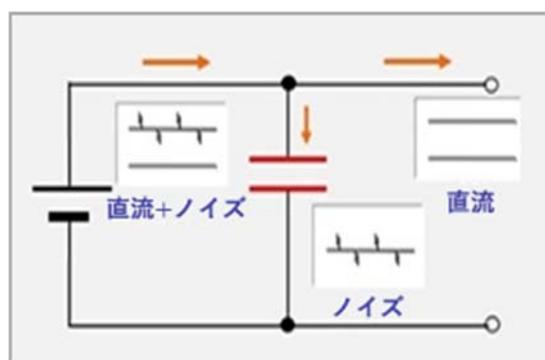
【平滑回路】

平滑回路は交流を整流した後の脈流を滑らかにし直流に変換する回路です。代表的な例としては電源回路があります。交流の入力電圧をダイオードブリッジで整流（回路例では全波整流）した電圧の波（リップル、脈流）を、コンデンサによってより平坦にします。



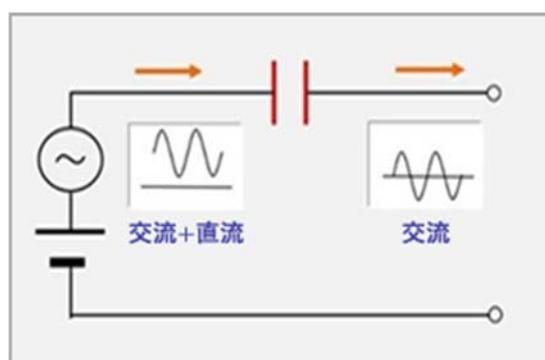
【デカップリング回路】

デカップリング回路は名称の通り、信号の結合を分離するためにコンデンサを利用する回路です。この例では、基本の交流に周波数の高い交流成分（ノイズ）を含む信号経路に図のようにコンデンサを入れることで、周波数の高いノイズ成分だけがコンデンサを通過して分離され、以降にノイズが伝わらないようにしています。スイッチング電源でのスイッチングノイズを取り除く用途がこれにあたります。



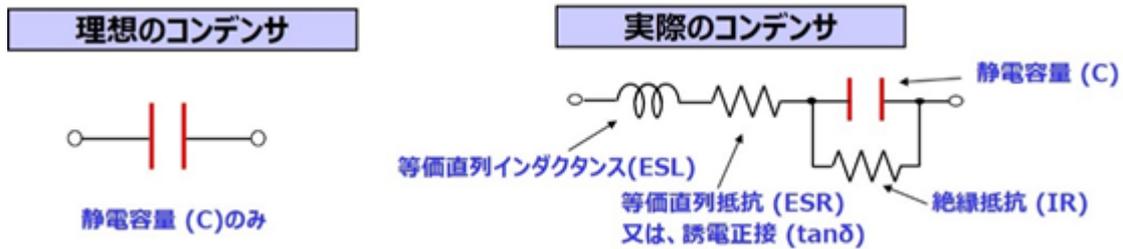
【カップリング回路】

カップリング回路は、直流成分は通さず交流成分のみを通過させる回路です。オーディオ信号の増幅回路等で、直流成分による影響を排除（DC カットなどとも言う）したい場合に使用されています。



コンデンサの特性

理想的なコンデンサは静電容量成分だけですが、実際のコンデンサは抵抗成分やインダクタンス成分を含んでいます。これらの寄生成分は、コンデンサの性能に大きな影響を与えます。コンデンサの簡易等価回路を図に示します。図が示すように、実際のコンデンサの等価回路には ESR（等価直列抵抗）、ESL（等価直列インダクタンス）が含まれます。また、コンデンサの電極間は理想的には絶縁ですが、実際には若干の漏れ電流が存在します。



これらの成分についてまとめました。

特性項目	解説
静電容量(C)	<ul style="list-style-type: none"> ・最も基本的な性能である ・製造ばらつき等で若干のばらつきが生じる ⇒静電容量許容差 (±5%, ±10% 等)
等価直列抵抗 (ESR) 誘電正接 (tanδ)	<ul style="list-style-type: none"> ・誘電体の種類による抵抗成分や電極、端子の抵抗成分で決まる値 ・ESR(又は tanδ)が大きいと電流による発熱で故障の要因となる ⇒流せる電流が規制される(許容電流値) ・また ESR(又は tanδ)が大きいとノイズ吸収効果が低減する。
絶縁抵抗 (IR)	<ul style="list-style-type: none"> ・主に誘電体の種類によって決まる漏れ電流の逆数 ・IR が低いと漏れ電流によるロスが大きくなる (アルミ電解コンデンサ等は漏れ電流を規定している)
等価直列インダクタンス (ESL)	<ul style="list-style-type: none"> ・主にコンデンサの構造によって発生するインダクタンス成分 ・ESL が大きいと高周波域でインダクタンス成分が優勢となりコンデンサの性能がでなくなる

加えて、もう1つ重要な特性として、インピーダンスがあります。インピーダンスは簡単に言うと、交流回路での電圧と電流の比で、直流回路での抵抗に当たるものです。記号はZを用い、単位は抵抗と同じΩを使います。

コンデンサのインピーダンス(Z)は次式①で表され、インピーダンスの絶対値は次式②で計算できます。

$$\textcircled{1} \quad Z = R + j 2\pi f L + 1 / (j 2\pi f C)$$

$$\textcircled{2} \quad |Z| = \sqrt{R^2 + (2\pi f L - 1 / (2\pi f C))^2}$$

Z : インピーダンス [Ω]

R : 抵抗成分=ESR [Ω]

J : 虚数

π : 円周率 (3.14)

f : 周波数 [Hz]

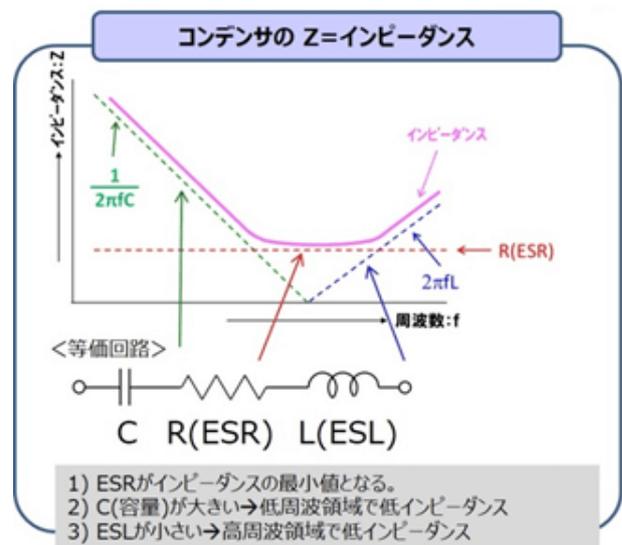
L : インダクタンス成分=ESL [H]

C : 静電容量 [F]

この式から、次のことがわかります。

- 1) 周波数が低い領域では、ほぼ静電容量(C)でインピーダンスが決定される。
- 2) 自己共振周波数 ($2\pi f L = 1 / (2\pi f C)$ となる周波数) では、ESRでインピーダンスが決定される。
- 3) 周波数が高い領域では、ほぼESLでインピーダンスが決定される。

これをグラフで示すと右図となります。



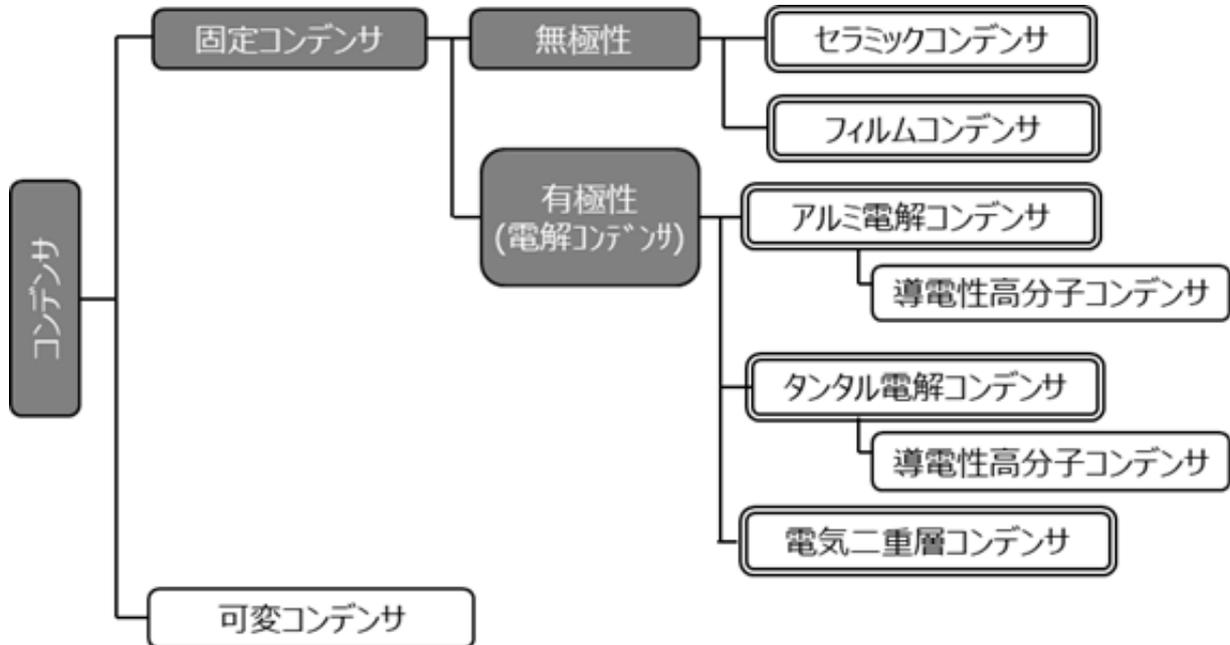
コンデンサのインピーダンスZは、自己共振周波数までは容量性(C)で低下しますが、自己共振周波数ではCやESLの影響がゼロとなりESRのみとなり、それを過ぎると誘導性(ESL)になり周波数とともに増加します。

コンデンサをその主要用途であるノイズ吸収(デカップリング)で使用する場合、インピーダンスでノイズ吸収効果が決まるため、以下のポイントで部品選定する必要があります。

- 1) ノイズの周波数とコンデンサの自己共振周波数が近いこと。
- 2) ESRが小さいこと。
- 3) 高周波ノイズの場合、ESLが小さいこと。

コンデンサの種類

コンデンサには使う材料や構造などによっていろいろな種類があります。また、種類によって特徴が異なり、設計ではこれらの特徴に基づいて選択します。主なコンデンサの種類を下図に示します。



可変コンデンサ

コンデンサは固定コンデンサが主流ですが、一定範囲で静電容量が変えられる可変コンデンサもあります。

可変コンデンサは、対向電極面積を変えて静電容量を変化させるものが一般的です。

また、可変コンデンサには、ラジオの選局などで頻繁に変化させるもの(バリャブルコンデンサ)と、回路の組み立て時に一度だけ調整のため変化させるもの(トリマコンデンサ)があります。

静電容量の変更は、ツマミやドライバーで行いますが、機械的に変化させる構造であるため、静電容量の大きなものを作るのが難しく pF (ピコファラド)レベルの小容量のものとなります。

無極性コンデンサと有極性コンデンサ

固定コンデンサは無極性コンデンサと有極性コンデンサに大別されます。

無極性コンデンサは、コンデンサの端子に印加する電圧の極性が規制されない、つまりどちらの端子がプラスであってもかまわないコンデンサです。無極性コンデンサであれば、ゼロ電位から上下する電圧を印加できるので、交流回路でも直接使用することができます。

無極性コンデンサはセラミックコンデンサとフィルムコンデンサが主流で、他にマイカコンデンサ、紙コンデンサ、空気コンデンサもあります。

それに対して有極性コンデンサは、2つの端子のどちらをプラス側とするかが決まっているコンデンサで、これを間違えて使用するとコンデンサが故障します。そのため、有極性コンデンサは直流電圧またはプラス側でのみ変動する電圧で使用しなければならないという制約があります。しかし、有極性コンデンサのほうが小形・大容量のコンデンサを得やすいというメリットがあるため広く使われています。アルミ電解コンデンサ・タンタル電解コンデンサ・導電性高分子(電解)コンデンサ・電気二重層コンデンサがこれにあたります。

セラミックコンデンサ

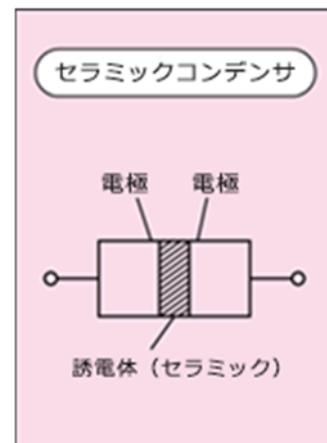
セラミックコンデンサは、誘電体に高誘電率のセラミックを用いたコンデンサで、以下の特長があります。

- ・無極性
- ・優れた高周波特性(低 ESR)
- ・高耐熱
- ・長寿命

もともとは高耐圧/低容量の単板コンデンサでしたが、薄膜積層構造により小形大容量化した積層セラミックコンデンサの出現や、欠点であった温度特性(温度による静電容量の変化率が大きい)を克服した温度補償用の出現によりその使用範囲が大きく拡大し、コンデンサの中で最も多く使用されるコンデンサとなりました。

なお、温度補償用は従来の高誘電率系より形状が大きく大容量化しにくいいため、用途により使い分けます。

但し、セラミックコンデンサには、DC バイアス特性(印加電圧により静電容量が大きく変化)や音鳴き(高周波による振動で異音が発生)、温度/機械的衝撃によりクラックが発生しやすいという欠点もあり、使用する上で注意が必要です。



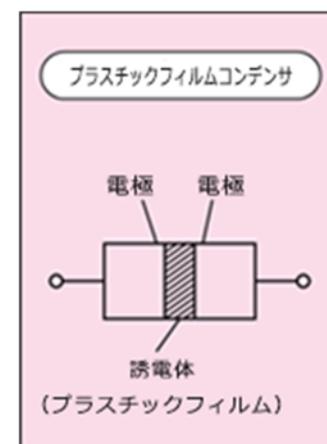
フィルムコンデンサ

フィルムコンデンサは、誘電体にプラスチックフィルムを用いたコンデンサで、以下の特長があります。

- ・無極性
- ・優れた高周波特性(低 ESR)
- ・優れた温度特性(温度による静電容量の変化率が小さい)
- ・静電容量の高精度対応可能
- ・長寿命

セラミックコンデンサと比較すると耐熱性は低いものの、優れた温度特性・静電容量の高精度対応可能の項目が追加されており、また DC バイアス特性や音鳴き、温度/機械的衝撃によるクラックの問題もありません。

そのためセラミックコンデンサより高性能なコンデンサではありますが、形状が大きく高価という短所があるため、セラミックコンデンサではカバーできない電圧・容量域や高性能/高精度用途で使用されます。



フィルムコンデンサは、使用する誘電体によっても下記の特徴があり、用途によって使い分けを行います。

項目	PET ポリエチレンテレフタレート	PP ポリプロピレン	PPS ポリフェニレンサルファイド	PEN ポリエチレンナフタレート
フィルム単価	◎	○	×	△
小型化	◎	△	○	◎
耐熱性	○	△	◎	◎
耐湿性	△	◎	○	△
tanδ(ESR)	○	◎	◎	○
使い分け	・リード線タイプ ・一般用	・リード線タイプ ・高周波/大電流用	・表面実装タイプ ・低圧 ・フロー/リフロー	・表面実装タイプ ・中圧 ・リフロー

◎:大変良い ○:良い △:あまり良くない ×:悪い

PETとPPはリード線タイプの誘電体であり、以前は小形で低価格のPETが一般用で、優れた高周波特性(低 ESR)のPPが高周波/大電流用という棲み分けでしたが、PPは高安全・高耐湿性という特徴もあり、またPPフィルムコンデンサの小型化技術の進展もあり、現在はPPが多く使用されています。

PPSとPENは高耐熱の特長から表面実装用フィルムコンデンサに使用されています。それらの電気特性は、PENがPETに近く、PPSがPPに近い特性を示します。

アルミ電解コンデンサ

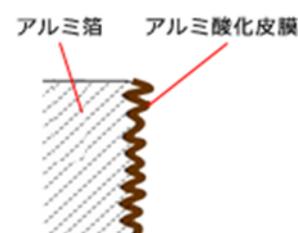
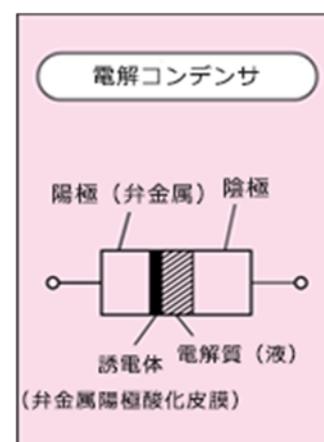
アルミ電解コンデンサは、陽極のアルミ箔の表面に誘電体となるアルミ酸化皮膜を形成させ、電解質(陰極)に電解液(溶媒に電解質を溶かした液体)を用いた構造です。

アルミ電解コンデンサは大容量であることが特長ですが、これはアルミ箔の表面をエッチングにより凹凸を形成することで電極表面積(S)を大きくし、さらに酸化皮膜の厚み(d)をオングストロームレベルの極薄で形成することで実現しています。

しかし、セラミックコンデンサやフィルムコンデンサと比較し、等価直列抵抗(ESR)が高くなります。

アルミ電解コンデンサは有限寿命品です。これは、電解液が温度により気化して封口ゴムから徐々に透過していくため、時間とともに容量が低下、ESRが上昇し、最終的にはオープン状態(電解液のドライアップ)になります。

アルミ電解コンデンサの寿命予測には一般的に「10℃2倍則」が適用できます。



タンタル電解コンデンサ

タンタル電解コンデンサの基本構造はアルミ電解コンデンサとほぼ同一であり、陽極となるタンタル金属粉の焼結体の表面に誘電体となる五酸化タンタルを形成させ、電解質として二酸化マンガン(固体)を用いた構造です。

タンタル電解コンデンサはアルミ電解コンデンサよりも小型で周波数特性に優れ、寿命が長い(電解質が固体)という特長があります。

しかし、故障モードがショートであり発火に至る危険性があるため、安全対策が必要です。

導電性高分子コンデンサ

導電性高分子コンデンサは、電解コンデンサの電解質を導電性高分子(固体)としたものです。

導電性高分子の電気伝導率は、アルミ電解コンデンサの電解液の 10000 倍、タンタル電解コンデンサの二酸化マンガンの 1000 倍と大変高く等価直列抵抗(ESR)が低いため、リップル吸収用途において他の電解コンデンサより有利となります。

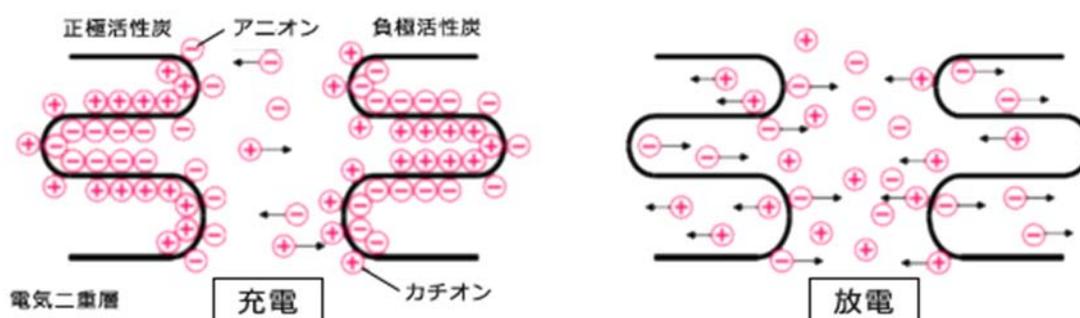
そのため、他の電解コンデンサから導電性高分子コンデンサへの置き換えが進んでいますが、高価であることと定格電圧の高い製品が無いため、用途に応じて他の電解コンデンサと使い分けられます。

電気二重層コンデンサ

電気二重層コンデンサは、アルミ電解コンデンサと二次電池(バッテリー)の中間の容量を持つ特殊なコンデンサであり、その容量密度はアルミ電解コンデンサの約 1000 倍以上で、二次電池の 1/10 程度です。

電気二重層コンデンサには電解コンデンサのような誘電体はありません。その代わりに電極と電解液の界面に形成される電気二重層を誘電体の機能として利用しています。これが電気二重層コンデンサの名前の由来です。

電気二重層コンデンサの充放電は、正・負極に用いた活性炭の電極表面のイオンの吸着・脱着を利用したものです。この充放電による二重層の変化を下図に示します。



電気二重層コンデンサを二次電池と比較すると以下のような特長があります。

- ・充放電サイクル数が特性劣化に殆ど影響しない (メンテナンスフリー)
- ・充放電が簡単 (0V まで放電可能、端子電圧でエネルギー量が分かる、微小電流・大電流充電可能)
- ・電池のような規制 (回収、廃棄、関税) の対象外

そのため、停電時の IC メモリのデータ保護など、バックアップ用電源として利用されます。

コンデンサの種類と特徴まとめ

これまで各種コンデンサの特徴について解説しましたが、それぞれのコンデンサを対比してまとめると下表となります。

項目	※ セラミック	フィルム	アルミ電解	タンタル電解	導電性高分子	電気二重層
高容量	△	×	○	○	△	◎
高電圧対応	○	◎	○	△	△	×
長寿命	◎	◎	△	○	○	△
温度特性	△	◎	△	○	◎	△
低ESR	◎	◎	×	△	○	×
極性	なし	なし	あり	あり	あり	あり
その他	DCバイアスによる容量変化大	高精度 価格が高い	価格が安い 小形状が無い	故障時に発火しやすい		
主要用途	・カップリング用 ・デカップリング用 ・平滑用	・電源ノイズ吸収用 ・放電回路用 ・共振用 ・力率改善用	・平滑用 ・デカップリング用	・カップリング用 ・デカップリング用	・平滑用 ・デカップリング用	・バックアップ用

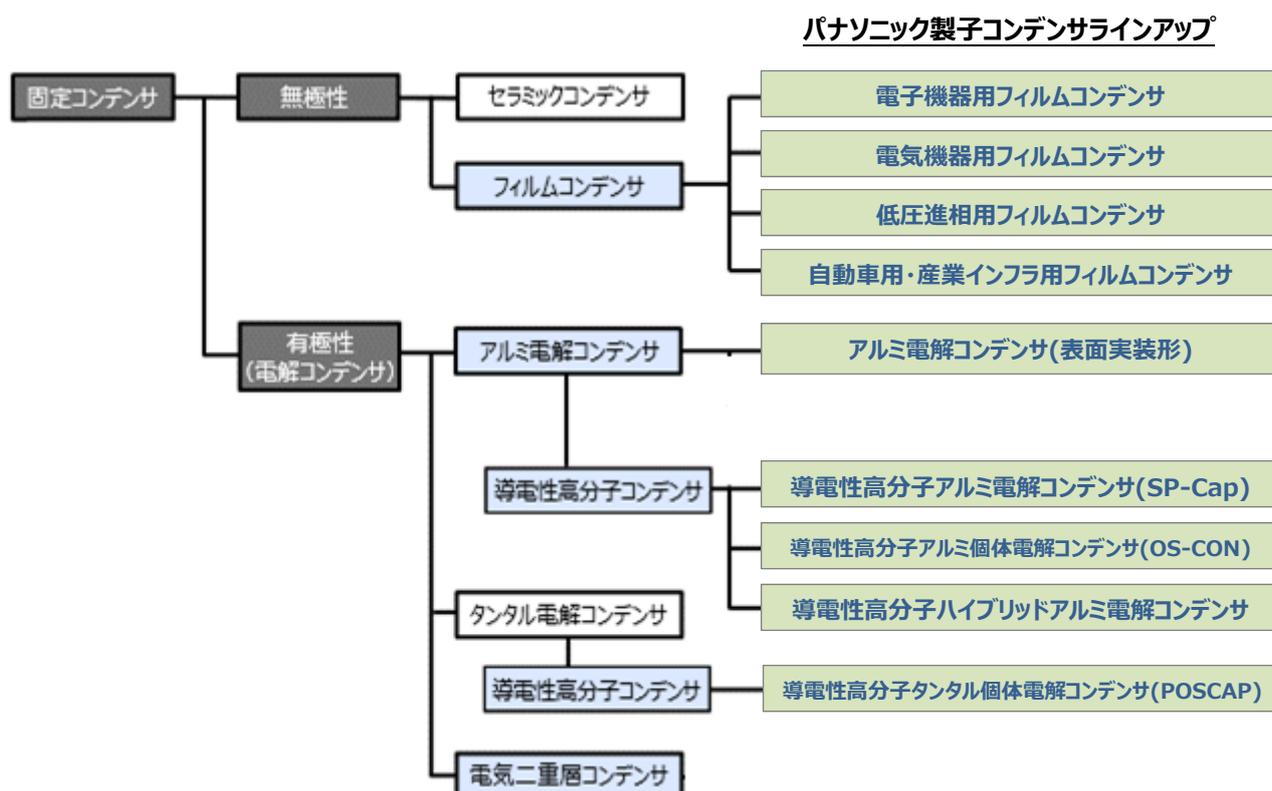
◎:大変良い ○:良い △:あまり良くない ×:悪い

※ セラミックは高誘電率系積層セラミックコンデンサの特性を示す。

パナソニックの商品ラインアップ

パナソニックでは以下のコンデンサを取り扱っています。

※各ラインアップをクリックすると詳細ページへ遷移します。



**回路設計の最適解 =技術情報=
コンデンサの基礎知識**

**発行日 初版 2019 年 1 月 18 日
改訂 2020 年 1 月 24 日**

**発行 パナソニック株式会社
インダストリアルソリューションズ社
デバイスソリューション事業部**

禁無断転載