

OPアンプ大全 **第 8 部**
ハードウェアとトラブル対策
Chapter-7 Hardware and Housekeeping Techniques

受動部品	13
プリント基板設計の諸問題	37
OP アンプ用の電源システム	69
OP アンプの保護	99
熱に関する考察	129
EMI と RFI への対策	139
シミュレーションとブレッドボードと プロトタイピング	179

はじめに

この大全のなかでも最も長い第8部(原著ではChapter-7)で述べるOPアンプの周辺技術は、今までに述べてきた基本的なOPアンプ回路技術と同じように重要です。

ここでは、システムのハードウェアや周辺回路技術に隠された問題点について述べます。「周辺回路技術に隠された回路やシステムの問題点」とは、OPアンプ以外の回路動作に必要なOPアンプ周辺の回路技術です。

このなかには、受動部品の特性、プリント基板の設計、電源回路、過大電圧や熱の影響からOPアンプを保護する方法、EMI/RFIの問題、そしてシミュレーションやブレッドボード、プロトタイプ製作が含まれます。いくつかの項目は直接にはデザインの手順と関係ありませんが、正しいデバイスや周辺回路定数の選択と同じように重要なものです。

Walt Kester, James Bryant, Walt Jung / 訳: 北村 透

第 1 章

受動部品

James Bryant, Walt Jung, Walt Kester / 訳: 北村 透

OP アンプや他の高精度アナログ IC を利用した回路設計をするとき、性能の悪い受動部品を利用しないようにしなければなりません。不適当な受動部品を選択すると、最高の OP アンプやデータ・コンバータを利用しても、その回路設計は失敗に終わってしまいます。本章では、OP アンプ回路における受動部品の一般的な「落とし穴」について述べることにします。

高価な高精度 OP アンプやデータ・コンバータを基板に実装したところ、システムが要求仕様を満足していないことに気付くことがあります。ドリフトや周波数特性、ときには発振で苦しむこともあるでしょう。あるいは単に期待した性能が出ないこともあるでしょう。このとき、デバイスを疑うまえに、受動部品...たとえばコンデンサ、抵抗、ポテンシオメータあるいはプリント基板...を十分に吟味したほうがよいでしょう。受動部品の小さな誤差、温度、寄生効果、経時変化、実装工程などが、あなたが意識しない影響を回路に与えているかもしれません。これらの影響は受動部品メーカーが規定していない特性(あるいはデータシートでちょっとだけ触れている特性)の影響なのです。

一般的に、12 ビット以上の分解能のデータ・コンバータか数百円の OP アンプを利用する場合、受動部品に十分な注意を払わなければなりません。12 ビットの D-A コンバータを例にあげると、1/2 LSB はフルスケールの 0.012 % (122 ppm) に当たります。複数の受動部品の誤差の累積は、この値をはるかに越える誤差をもたらします。しかし、問題を解決するために最も高価な受動部品を購入する必要はありません。通常、数十円の適切なコンデンサを選択すれば十分な性能と、非常に高価な部品と比較しても、コストパフォーマンスの優れた設計ができます。受動部品の基本的な理解と解析に労力を払う価値が十分にあります。

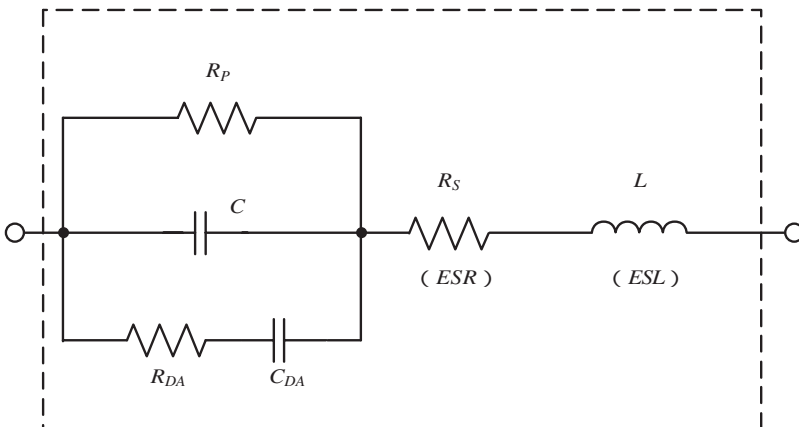
1-1 コンデンサ

ほとんどの設計者は、入手可能な種々のコンデンサについて慣れ親しんでいることと思います。しかし、コンデンサの種類があまりに多いために、コンデンサを利用した高精度回路における動的/静的な誤差発生メカニズムを忘れてしまうことがあります。コンデンサの種類は、ガラス・コンデンサ、アルミ箔電解コンデンサ、固体タンタル・コンデンサ、タンタル箔電解コンデンサ、マイカ・コンデンサ、セラミック・コンデンサ、テフロン・コンデンサ、そしてポリエステル、ポリカーボネート、ポリスチレン、ポリプロピレンを含むフィルム・コンデンサなどがあります。さらに、実装方法で区分すると、従来からあるリード・タイプと最近多数利用されている表面実装タイプがあります。

図1-1にコンデンサの動作モデルを示します。キャパシタンス C が、絶縁抵抗(漏れ電流を生じる)を表す並列抵抗 R_p で短絡されています。コンデンサのリード線や電極の抵抗を代表する第2の抵抗 R_s (等価直列抵抗; ESR) は、コンデンサに直列に接続されます。

コンデンサの特性を各要素に分離することは簡単ではありません。個々の特性とモデルの関係を明確に説明することは困難です。インダクタンス L (等価直列インダクタンス; ESL) は、リード線や電極のインダクタンスを表します。抵抗 R_{DA} とキャパシタンス C_{DA} の組み合わせは、誘電体吸収(dielectric absorption; DA) を単純化したモデルです。この誘電体吸収効果は、高速および低速回路の動特性に大きな影響を与えることがあります。実際のコンデンサは、 R_{DA} と C_{DA} の直列回路を複数個並列接続した回路と考えることができます。これらの寄生 RC 素子は、タイミング回路の特性を劣化させることがあります。以下に現象の詳細を述べます。

図1-1 寄生素子を含む実際のコンデンサの等価回路



● 誘電体吸収 (Dielectric Absorption ; DA)

誘電体吸収(「ソーケイジ(soakage)」または「誘電体ヒステリシス」とも呼ばれる)は、コンデンサの寄生効果のなかで大きな影響を与える可能性をもった効果であるにもかかわらず、あまりよく理解されてはいません。放電時に、ほとんどのコンデンサは、メモリ効果により充電した電荷をすべて放電することができません。

図 1-2 にこの現象を図示します。左図に示されるように、コンデンサは電源電圧 V まで充電されたのち、時刻 t_1 でスイッチ S_1 により短絡されて放電します。その後、 t_2 においてコンデンサの端子は開放されます。すると端子電圧はゆっくりと上昇し、ほぼ一定の電圧に達します。この残留電圧の原因は誘電体吸収であり、右図に示されるように充電 - 放電 - 復帰シーケンスの時間と電圧で決定されます。復帰電圧の誤差は充電電圧 V と使用されているコンデンサの誘電体吸収の特性に比例します。

誘電体吸収を測定あるいは規定する標準的な方法は極めて少ないと言えます。測定結果は、コンデンサに充電された電圧と、再び現れた電圧の比をパーセントで表します。標準的な試験手順は以下のとおりです。まず、コンデンサを十分に長い時間充電し、その後、短い一定時間だけ短絡します。さらにコンデンサを開放状態で一定時間放置し、端子電圧を測定します[詳細は参考文献(8)を参照のこと]。ここでは基本的な現象を説明しましたが、実際のコンデンサは極めて広い範囲の誘電体吸収による誤差を示し、その誤差は誘電体の種類により決定され、1%程度か、それ以下の値を示します。実際の誘電体吸収はいろいろな形で現れます。積分器がリセット後に0Vにならない、電圧 - 周波数変換回路が予期しない非直線性を示す、あるいはサンプル&ホールド回路が一定とならない誤差を示したりします。サンプル&ホールド回路で発生する現象は、データ収集システムの隣り合ったチャンネルに、フルスケールに近い電位差が印加されたとき特に大きな影響を与えます。

図 1-2 誘電体吸収を規定する充放電後の開放残留電圧

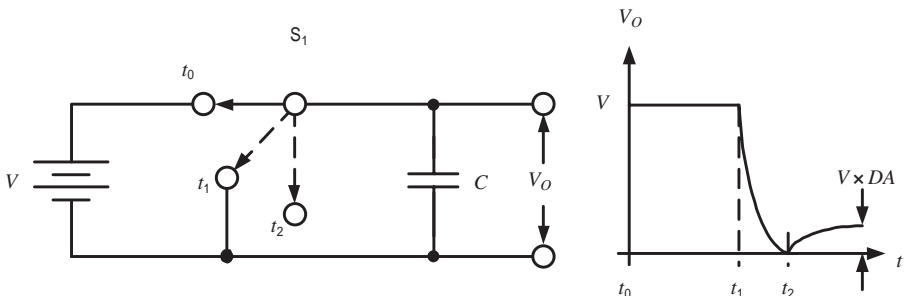


図 1-3 サンプル&ホールド回路において誘電体吸収が発生する誤差

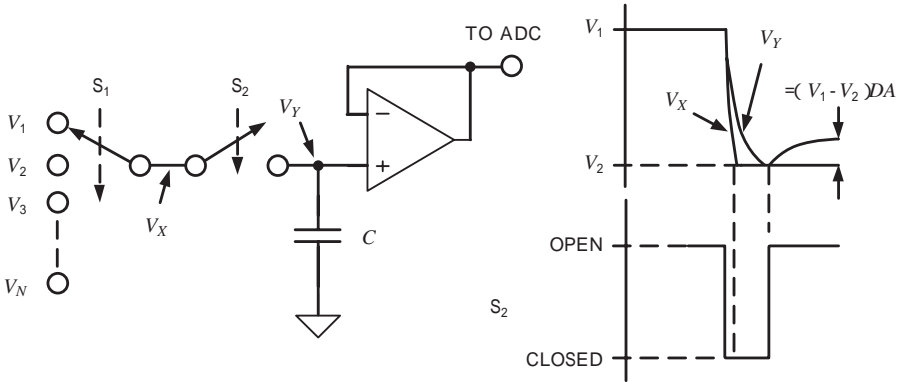


図 1-3 は簡単なサンプル&ホールド回路における誘電体吸収誤差を示します。左図において、スイッチ S_1 と S_2 はそれぞれサンプル&ホールド回路のマルチプレクサとサンプル&ホールド・スイッチを示しています。ここで、マルチプレクサの出力電圧を V_X 、A/D コンバータに印加するために OP アンプで増幅した後に C でホールドする電圧を V_Y とします。右のタイミング図に示されるように、誘電体吸収による誤差電圧はコンデンサが開放されているホールド・モードの間に現れます。この電圧は V_1 と V_2 の差に比例するため、それぞれの電圧がダイナミック・レンジの最大値と最小値を取ったとき、もっとも大きな値となります。サンプル&ホールド回路の誘電体吸収による誤差を最小にする現実的な方法は、最良のコンデンサを利用することです。

誘電体吸収現象は、コンデンサの製造工程や電極材料により影響を受けることもありますが、おもに誘電体材料の特性で決定されます。誘電体吸収は充電電圧に対して発生する電圧のパーセントで定義されます。テフロン、ポリスチレン、ポリプロピレン・コンデンサにおいては 0.02 % ですが、電解コンデンサでは 10 % か、あるいはそれ以上のこともあります。特殊なポリスチレン・コンデンサの誘電体吸収は約 0.002 % です。

一般的な高誘電率セラミック・コンデンサやポリカーボネート・コンデンサの誘電体吸収は 0.2 % 程度ですが、この値は 8 ビットでの 1/2 LSB に相当します。シルバード・マイカ、ガラス、タンタル・コンデンサはさらに大きく 1 ~ 5 % 程度の値を示し、ポリエステルは 0.5 % 程度を示します。コンデンサの規格表に、利用しようとしている電圧レンジや時間における誘電体吸収が規定されていなければ注意してください。そのような場合は、低い誘電体吸収を規定しているほかのタイプのコンデンサを選択したほうが無難でしょう。

誘電体吸収は、ハイパス・フィルタや AC アンプの高速セトリング回路などの過渡応答

において長いセtringの原因となります。このような用途に利用されるコンデンサでも、**図 1-1** に示した R_{DA} と C_{DA} で決定される時定数が数 ms を示すことがあります。さらに長い時定数もまれではありません。複数の異なる時定数をもつ R_{DA} - C_{DA} 並列回路でモデル化されるデバイスもあります。高速充電、高速放電用途で誘電体吸収はアナログ・メモリのようにふるまいます。コンデンサが過去の充電電圧を思い出そうとしているかのようです。

回路によっては誘電体吸収の特性が単純で、簡単に定義できる場合もあり、特別な調整を実施することにより補正することができます。たとえば、積分器の積分コンデンサと並列に誘電体吸収と等価な負性抵抗帰還回路を接続することで補正できます。このような補正を施すことにより、サンプル&ホールド回路の性能を 10 倍以上高めることができます [文献(6)参照]。

●コンデンサの寄生インピーダンスと損失

図 1-1 にコンデンサの漏れ抵抗 R_p と等価直列抵抗 R_s 、そして直列インダクタンス L を示しました。これらの寄生インピーダンスは回路の特性を劣化させます。これらの効果をまとめて損失 (DF) と定義することができます。

コンデンサの漏れ電流は、電圧を加えたときに誘電体に流れる微小電流です。等価回路は単純なコンデンサに並列接続された絶縁抵抗 R_p ですが、このリーク電流は実際には電圧に対して非直線な値を示します。製造メーカーは誘電体の自己放電時定数として、リーク抵抗と容量の積をとり、 $M \cdot \mu F [秒]$ として表すこともあります。リークの多い電解コンデンサの場合、この値は 1 秒より小さな値をとり、セラミック・コンデンサの場合は 100 秒程度です。ガラス・コンデンサの場合、自己放電時定数は 1000 秒以上です。しかし、もっとも漏れ電流が少ないコンデンサはテフロン・コンデンサや特定のフィルム・コンデンサ(ポリスチレン、ポリプロピレン)で、1,000,000 $M \cdot \mu F$ に達します。このようなコンデンサでは、リーク電流は誘電体内部ではなく、素子のケースや配線など機構構成物の表面を流れます。

等価直列インダクタンス ESL (**図 1-1** 参照)は、コンデンサのリード配線や電極で発生し、高周波において本来なら容量性のリアクタンスを示すコンデンサ特性が誘導性になってしまいます。 ESL の値はコンデンサの内部構造に強く依存します。金属箔を巻いた筒状タイプのコンデンサは、モールドされたラジアル・リードのコンデンサと比較して、かなり大きな ESL を示します。多層セラミック・コンデンサやフィルム・タイプのコンデンサは最も小さな直列インダクタンスを示し、タンタル・コンデンサや電解コンデンサは一般に最も大きな値を示します。その結果、一般的な電解コンデンサだけで高速信号をバイパスすることは適当ではありません。高速信号のバイパス・コンデンサ用に作られた特殊なタンタル・コンデンサやアルミ電解コンデンサを利用します。これらは、次章で述べ

るように、スイッチング電源用に設計されたタンタル・コンデンサやアルミ電解コンデンサです。

コンデンサの製造メーカは、等価直列インピーダンスをインピーダンス - 周波数特性のグラフで定義する場合があります。このカーブは低周波の部分ではほぼ容量性ですが、高い周波数では直列インダクタンスの影響によりインピーダンスが増加します。

等価直列抵抗 ESR (図 1-1 では抵抗 R_S) の原因は、コンデンサのリードや電極の抵抗です。すでに述べたように多くのメーカは ESR , ESL , リーク電流をひとまとめにし、損失 DF (Dissipation Factor) で表しています。損失はコンデンサの効率の悪さを示します。製造メーカは、コンデンサの1サイクル中に失われたエネルギーと保存されたエネルギーの比として定義しています。ある周波数における ESR とコンデンサの総リアクタンスの比は、 DF の値にほぼ等しく Q の逆数と等価値となります。よって、 $Q = 1/DF$ (DF は数値で示される) と近似されます。たとえば DF が 0.1 % であれば、この値は 0.001 ですから、逆数を計算すれば Q は 1000 となります。この損失は温度と周波数によって変化します。マイカ・コンデンサやガラス・コンデンサの DF は一般に 0.03 % ~ 1.0 % です。一般的なセラミック・コンデンサの DF は室温において 0.1 % ~ 2.5 % です。電解コンデンサは通常大きな値を取ります。フィルム・コンデンサは最も良く、0.1 % 未満です。安定なセラミック・コンデンサ、特に C0G (あるいは NPO と呼ばれている。訳者注: C0G が一般的な呼び名になってきている) タイプのコンデンサの DF は、フィルム・コンデンサと同等かそれ以下の値です。

● 誤差、温度とその他の影響

一般的に、高精度コンデンサは高価で入手が困難な場合もあります。実際に利用できるのは、限られた範囲の容量値と限られた誤差のコンデンサです。大容量コンデンサについて考えると、比較的性能のよいフィルム・コンデンサは 10 μF 以下に限られています(大きさと価格の制約がある)。容量誤差の小さなコンデンサは、C0G (NPO) セラミック・コンデンサとある種のフィルム・コンデンサで、 $\pm 1\%$ 誤差のものが入手可能ですが、納期が長い場合があります。 $\pm 1\%$ の各種フィルム・コンデンサは一般に受注生産品です。

ほとんどのコンデンサは温度により特性が変化します。誘電体吸収や誘電体損失、容量値は温度とともに変化します。コンデンサの特性は温度とともに直線的に変化するものもありますが、非直線的に変化するものもあります。サンプル&ホールド回路においてコンデンサ容量値の温度変化は一般に重要ではありませんが、極端に大きな温度係数 TC (Temperature Coefficient, ppm/ で表される) は高精度積分器、 $V-F$ 変換回路や発振回路の性能を劣化させます。C0G (NPO) セラミック・コンデンサは、 TC が 30 ppm/ で最高の安定度を示します。ついでポリスチレンやポリプロピレン・コンデンサが 100 ~

200 ppm/ と安定です。コンデンサの安定度が重要な場合、数百 ppm/ のコンデンサや温度係数が非直線的なコンデンサを選択してはいけません。

予想される環境条件から、コンデンサの最高動作温度を考慮する必要があります。たとえば、ポリスチレン・コンデンサは約 85 で溶け始めますが、テフロン・コンデンサは 200 でも動作します。

実際の回路において、誘電体吸収や容量値は印加電圧の影響を受け(電圧係数と呼ばれる)、コンデンサが要求性能を満たさなくなることがあります。コンデンサ・メーカーは必ずしも電圧係数を明確に定義していませんが、設計者は電圧係数の影響を考えなければなりません。たとえば、高誘電率系のセラミック・コンデンサに定格ぎりぎりの電圧を印加すると、容量値は半分以下になってしまいます。このことは歪みの発生を意味しますから、高誘電率系のセラミック・コンデンサをフィルタ回路などに用いることはできませんが、電源のバイパス・コンデンサであれば問題はありません。面白いことに C0G(NPO)タイプは同じセラミックのなかでも安定な誘電体で、低い電圧係数を備えています。

同じように、コンデンサの容量値や誘電体損失は、誘電率の周波数依存性により周波数とともに大きく変化します。ポリスチレン、ポリプロピレンやテフロンはこの特性が良い誘電体材料と言えます。

●重要な部品は最後に実装のこと

設計者の心配は回路設計が終了しても尽きません。最高のデザインをもってしても、プリント基板への実装時の問題がすべてをだめにしてしまうことがあります。たとえば、一般的に利用されているある洗浄液は電解コンデンサに浸透していきます(ゴムで蓋がしてあるタイプはとりわけ洗浄時に問題が起きやすい)。

さらに悪いことに、フィルム・コンデンサ(特にポリスチレン・コンデンサ)の種類によっては、洗浄液に触れると溶けてしまうこともあります。これ以外の種類のコンデンサであっても、リード線を粗雑に扱おうと再現しにくい間欠的な故障を引き起こします。金属箔をエッチングしたタイプは、このような問題を引き起こしやすいといえます。問題を避けるために、できるならばこのような部品は最後に実装するのがよいでしょう。

表 1-1 にいろいろなコンデンサの特徴をまとめ、おおよそ誘電体吸収特性の良い順に並べました。この表をまとめるにあたり、部品メーカーのカタログを参照しました(本章最後の参考文献を参考のこと)。

設計者はコンデンサの故障モードも考慮しなければなりません。たとえば、メタライズド・フィルム・コンデンサは自己修復性を備えています。最初に、絶縁膜の小さなピンホールにより電極間が短絡します。しかし、電極間に流れる電流が熱を発生し、短絡は融け去り、若干の容量の減少を伴いますが元の状態に復帰します。ただし、高インピーダンス

回路では十分な電流が流れないために短絡は溶融されず、故障は解消されません。

タンタル・コンデンサはフィルム・コンデンサとは様子が異なり、故障発生箇所の温度がゆっくりと上昇すると自己修復作用が認められます。したがって、タンタル・コンデン

表 1-1 各種コンデンサの比較

タイプ	代表的な DA	長 所	短 所
ポリスチレン	0.001 ~ 0.02 %	安価 DA 小 高安定度(0 ~ 120 ppm/)	温度により劣化(> 85) 大きい インダクタンス大 ベンダが限られる
ポリプロピレン	0.001 ~ 0.02 %	価格は中程度 DA 小 安定(0 ~ 200 ppm/) 広範囲の容量あり	温度により劣化(> 105) 大きい インダクタンス大
テフロン	0.003 ~ 0.02 %	小 DA 品あり 高安定 動作温度範囲が広い(+125 以上) 広範囲の容量あり	高価 大きい インダクタンス大
ポリカーボネート	0.1%	高安定 安価 動作温度範囲が広い 広範囲の容量あり	大きい DA は 8 ビット相当 インダクタンス大
ポリエステル	0.3 ~ 0.5 %	安定度は中程度 安価 動作温度範囲が広い インダクタンス小 (フィルムの積み重ね構造)	大きい DA は 8 ビット相当 インダクタンス大(通常品)
セラミック(COG)	0.1 % 以下	小型 安価, 多数のベンダ 高安定(30 ppm/) 1 % 精度あり インダクタンス小(チップ品)	DA は一般的に小(規格なし) 高容量はなし(10 nF 以下)
モノリシック・セラミック (高誘電率系)	0.2 % 以上	インダクタンス小(チップ品) 容量範囲大	不安定 DA 大 電圧係数大
マイカ	0.003 % 以上	高周波のロス小 インダクタンス小 高安定 1 % 精度あり	大きい 高容量はなし(10 nF 以下) 高価
アルミ電解	極めて大	大容量 大電流 高耐圧 小型	リーク電流大 一般的には有極性 安定度, 精度ともに悪い インダクタンス大
タンタル	極めて大	小型 大容量 中程度のインダクタンス	リーク電流大 一般的には有極性 高価 安定度, 精度ともに悪い