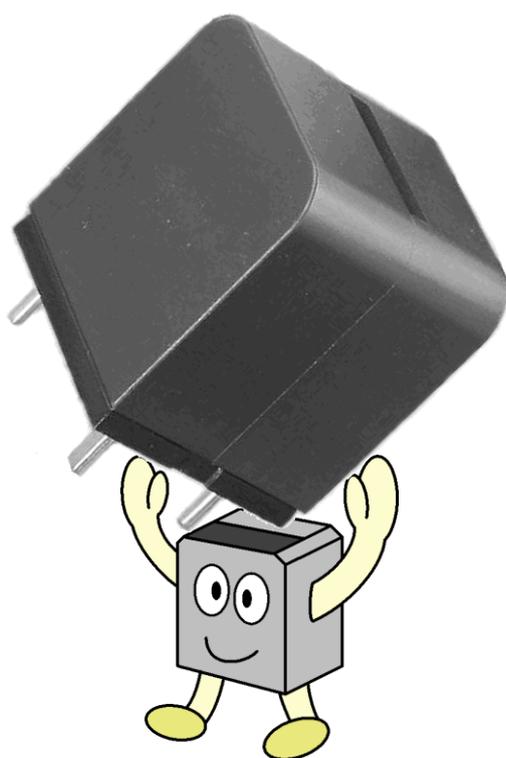


コイルを使う人のための話

第一部



サガミ エレク株式会社

<https://www.sagami-elec.co.jp/>



弊社製品をご使用頂く上でのお願いです。

【コイル製品の保管・取り扱い上の注意】

- コイル製品の保管に当っては、高温・多湿・塵埃・腐食性ガス等の悪環境を避けて下さい。
- コイル製品の乱雑な扱い・落下・バラ積みは避けて下さい。破損の恐れがあります。
- コイル製品端子に直接手を触れないで下さい。脂により半田付け性が劣化する恐れがあります。

【コイル製品の使用上の注意】

- コイル製品端子は折り曲げないで下さい。ストレスによる断線の原因になります。
- コイル製品端子は切断しないで下さい。
- コイル製品の端子 及び ケースラグ部は、全てプリント基板に半田付けして下さい。
- コイル製品の洗浄は避けて下さい。洗浄が必要な場合は、当社にご相談下さい。
- コイル製品の実装位置は、プリント基板の周辺部分はできるだけ避けて下さい。
- 面実装コイル製品は、自動実装を前提に設計しておりますので、手半田の取付けをされる場合は取り扱いに充分ご注意願います。
- 面実装コイル製品のマウントに当っては、巻線露出部分や端子への接触は避けて下さい。
- 面実装コイル製品のリフロー半田付けに当っては、半田付け条件を守って下さい。

目次

コイルを使う人のための話

第 1 回 コイルとインダクタの違いは	3
第 2 回 コイルのパラメータ(電氣的仕様)	5
第 3 回 コイルのインダクタンス	8
第 4 回 インダクタと発熱	10
第 5 回 コイルの Q	12
第 6 回 インダクタの自己共振周波数	15
第 7 回 コイルの開磁路と閉磁路	18
第 8 回 渦電流と磁気シールド	20
第 9 回 温度特性と絶縁特性	22
第 10 回 コイルの働き(動作)	24
第 11 回 コイル間の結合	26
第 12 回 コイルを使用する時	28

注意事項

1. 本文中に掲載の製品の一部には、既に生産が終了しているものが含まれています。
2. 記事作成から時間が経過しているため、記載の情報が古いままの内容が含まれています。

コイルを使う人のための話(第1回)

●はじめに

「電子部品の中で、コイルは非常に分かり難い」ということを良く耳にします。確かに、コイル屋からみても、同じ受動部品の抵抗(R)やコンデンサ(C)と比較して、分かり難い気がします。

そこで、「コイルをもっと理解してもらって、もっと使ってもらおう」と言うことで、コイル屋の立場での「コイルを使う人のための話」と言うのを連載(2週間に1回の内容で全12回を予定)することになりました。実際にコイルを使用して設計されている方の、お役に立てれば幸いです。

●コイルとインダクタの違いは？

サガミでは、電線を巻いてスプリング状(巻線)にしたものを利用している部品を「コイル」と呼んでいます。その中で、「巻線が1個のもの」を特にインダクタと称しています。

但し、「インダクタを物理的に2個以上くっつけた製品」もインダクタと呼んでいます。イメージとしては、図-2のように「コイルの中にインダクタ、トランス、フィルタなどが存在する」形になります。

業界としても、特別に決まりがある訳ではありませんが、国際規格(IEC)などでも、コイルではなく「磁性部品 Inductive components」「トランス Transformers」や「インダクタ Inductors」が使用されています。

もちろん、インダクタをコイルと称しても何の問題もありません。

ちなみに、「サガミは？」と聞かれたら、「コイルメーカーです。」と答えが返ってくるでしょう！。

サンプルを依頼するときも、何も考えずに、「コイル」と言って頂ければ、キチンと伝わりますので、ご安心下さい。

さて、皆さんの社内では、どのように呼ばれているのでしょうか？。

参考までに、JIS C 5602「電子機器用受動部品用語」では、「コイル:一般的には、絶縁体の表面上に導体を巻いて作った自己インダクタンスを持つ部品」と記載されています。

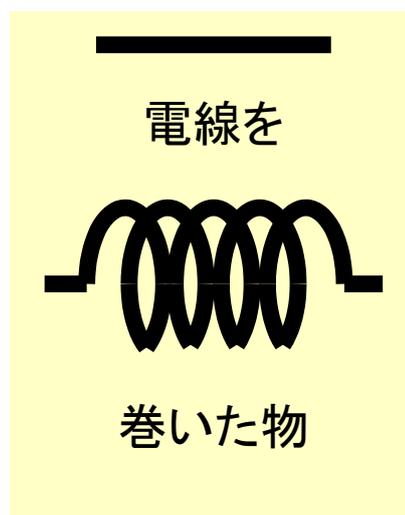


図-1

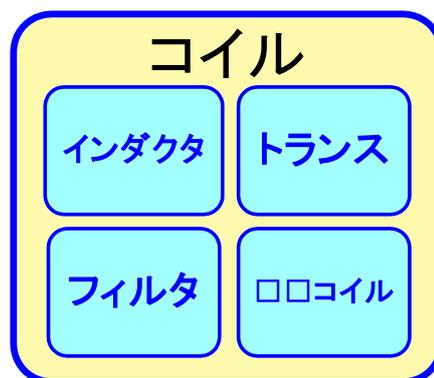


図-2

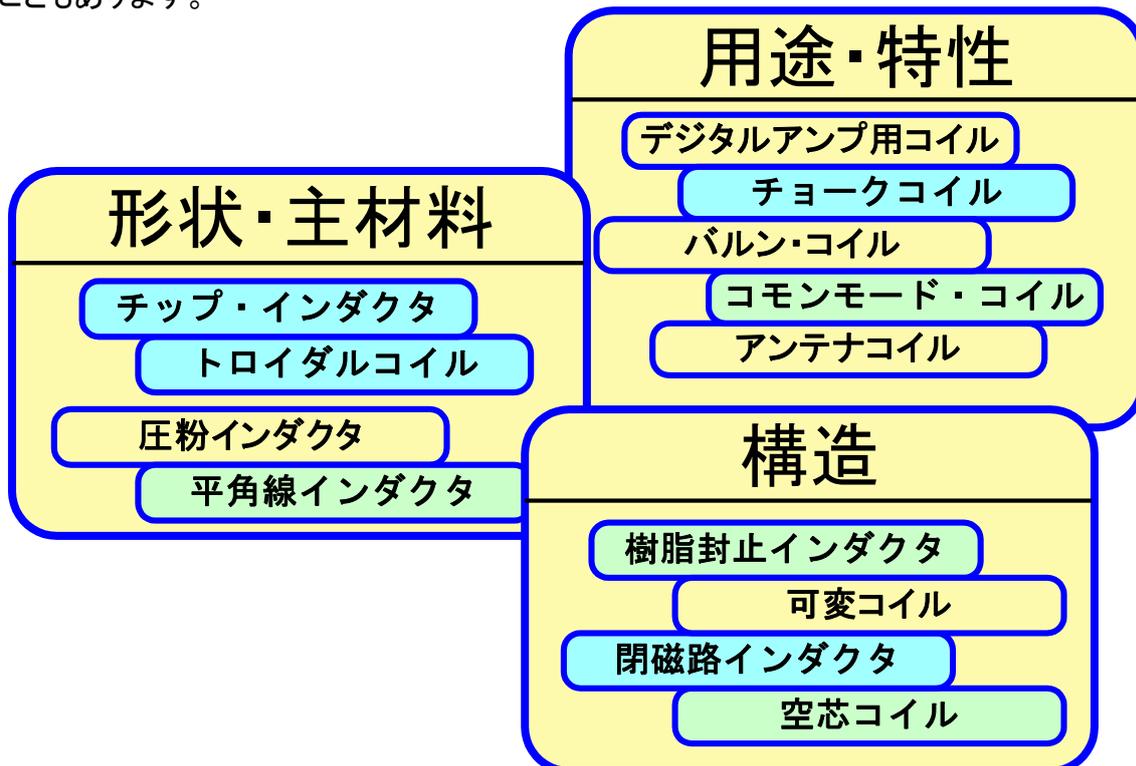
●見た目は同じなのに名前が違うのは？

他の部品でもそうですが、製品の名称を「使っている材料」で呼ぶ場合と、「使用用途」や「電気的特性」で呼ぶ場合があります。コンデンサの場合ですと「使用している材料」で呼ぶ場合が多いようですが、コイルの場合は両方を混在させています。

コンデンサの場合は、使用材料と使用用途が関連している場合が多いのですが、コイルの場合は必ずしもそうではありません。「〇〇用インダクタ」と言っても、他の用途に使用できないことは、先ずありません。

特に、使用用途に向けて最適化をしたコイルの場合、敢えて「〇〇用コイル」と呼び、お客様にアピールすることがあります。

逆に、お客様から「〇〇用コイル」と指名され、それをコイルの製品名として利用させて頂くこともあります。



各社で、形状も異なるし名称も異なるし、本当に分かり難くて申し訳ありません。

コイルを探すときには、カタログなどの製品名に囚われなくて、仕様の内容を良く見て検討してみてください。特性が合えば、メーカーが想定している以外でも使用可能な場合が結構ありますので、遠慮なく声を掛けて下さい。

(星野)

コイルを使う人のための話(第2回)

●はじめに

第1回に続いて、第2回は「コイルのパラメータ(電氣的仕様)」についてです。なお、これから先当分の間は、インダクタ(固定コイル)の話を中心にいきます。

●インダクタの仕様を決めるためのパラメータ(要素)

インダクタのパラメータの主なものには、次のようなものがあります。もちろん、これらの全てが必要なわけではありませんので、用途に応じて必要なパラメータのみが必要になります。カタログなどにも、インダクタの用途を想定して、必要なパラメータのみが記載されています。

- ① インダクタンス: もちろん必須事項になります。
- ② 直流抵抗: 電源に使用されるインダクタでは、必須事項になります。
- ③ 直流重畳電流: 電源に使用されるインダクタでは、必須事項になります。
- ④ 許容電流: 電源に使用されるインダクタでは、必須事項になります。
- ⑤ Q: 高周波用のインダクタで使用されることが多い。
- ⑥ 自己共振周波数: 高周波用のインダクタで使用されることが多い。
- ⑦ インピーダンス: 特殊なインダクタで使用されることが多い。
- ⑧ 温度上昇: 電源に使用されるインダクタでは、必須事項になります。

●それぞれのパラメータの概要

理想のインダクタとは、インダクタンスの値が一定、損失がゼロ(直流抵抗=0, Qの値が ∞)、流せる電流が ∞ 、発熱がゼロで、自己共振周波数が ∞ 、と言った仕様になります。

でも、これは回路上またはシミュレーション上の話であって、実際のインダクタの場合は、全ての値が有限の値になってしまいます。理想のインダクタとの違いを表すために、色々なパラメータが使用されています。



① インダクタンス:

インダクタの電氣的な大きさを表し、単位はH(ヘンリー)です。現実の世界では、 μH (マイクロ・ヘンリー: $\times 10^{-6}$)や mH (ミリ・ヘンリー: $\times 10^{-3}$)などが良く出てきます。

② 直流抵抗:

巻線(銅線)の抵抗分に相当します。これが小さいほど、損失が少なくなります。電源回路に使用する場合は、重要なパラメータになります。

③ 直流重畳電流:

インダクタに直流電流を流すと一般にインダクタンスが減少しますので、インダクタンスの減少の目安を表す電流値になります。なお、減少したインダクタンスは、電流の値が小さくなれば元に戻ります。

④ 許容電流:

インダクタに流すことができる最大電流を表します。これ以上電流を流すと、インダクタが損傷することがあります。インダクタは電流型の素子なので、電流で使用条件が制限されます。

⑤ Q:

規定の周波数の交流における、インダクタの良さを指数として次式で表した値です。無名数なので、単位はありません。

$$Q = \frac{\omega L}{r} \quad r: \text{その周波数での損失を表す抵抗分}$$

⑥ 自己共振周波数:

インダクタには、微少な浮遊容量(コンデンサ成分)が存在し、それとインダクタンスが共振現象をおこします。この時の周波数のことを表しています。

⑦ インピーダンス:

規定の周波数の交流における、インピーダンスを表しています。特別な場合に使用されます。

●インダクタの電流特性について

これも、分かり難い仕様の一つなので説明を行います。電流規格には、大きく分けて次の2種類があります。

- ① これ以上流すと、コイルが**発熱で破損**する電流値(直流)
→ 一般に「**温度上昇(許容)電流**」と言われることが多い。
- ② コイルは破損しないが、インダクタンスの**劣化が大きくなる**電流値(直流)
→ 「**直流重畳(許容)電流**」と言われることが多い。

なお、コイル業界では、上記①と②の小さい方を単に「**定格電流**」と言うことが一般的です。必要とする特性を確認の上、仕様書の電流規格もじっくり見て頂けると助かります。

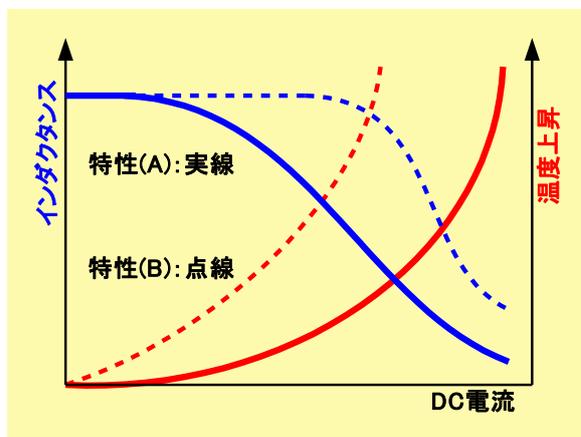
「**定格**」の意味には次の2つがありますが、コイルの場合は後者になります。

- ①基準値: 電源電圧などの動作の基準になる値
- ②最大値: 許容できる最大の値

インダクタの中には、同じ電流仕様でも**発熱が少ない特性と直流重畳特性**延びた右図(A)(B)の2種類の特性の製品が存在します。

DC/DC 電源の場合は、電流が連続して流れることが多いので、一般に特性(A)のインダクタ(通常のインダクタ)が使用されます。

最近はやりのデジタル・アンプの場合は、瞬間的に大きな電流が流れることが多いので、特性(B)のように発熱よりも、ピーク電流でインダクタが飽和しない特性が使用されることがあります。



参考までに、弊社デジタルアンプ用インダクタ「7G17D」の特性例を示します。



品番	インダクタンス (μH)	直流重畳許容電流 (A)	温度上昇許容電流 (A)
7G17D-100M	10±20%	26.0	8.2
7G17D-220M	22±20%	13.0	8.2
7G17D-330M	33±20%	7.5	8.2

※電流仕様の違いに注目して下さい。

他にも、インダクタンスの減少曲線が急峻な特性と緩やかな特性の製品(構造・材質の違いによる)がありますので、使用する回路に合わせてインダクタを決める参考にして下さい。

●インダクタを決定するには？

インダクタも電子部品なので、最初に上記の「電氣的パラメータ」を決めますが、それ以外にも形状、構造、使用環境などの条件を考慮してインダクタを決めます。仕様書に出てこない特性の資料も提供可能ですので、遠慮無く問い合わせしてみてください。

●直流重畳特性(インダクタンスの飽和)について

電線を巻いただけでコイル(これを「空芯コイル」と言う)を作ることはできますが、形状を小さくするために磁性材料を組み合わせ使用します。「空芯コイル」に、磁性材料のひとつのフェライトコアを組み合わせると、インダクタンスを数倍～数百倍にすることができます。

ただ、磁性材料には磁気飽和というのがあって、磁気飽和が起こるとインダクタンスを高める効果が減少するので、結果としてコイルのインダクタンスが減少してしまいます。

一般的に、同じインダクタンスならば、形状が小さいほど磁気飽和が早く起こるので、直流重畳特性の劣化が大きくなります(流せる電流が少ない)。それでも、材質の改善によりインダクタの形状も小さくなりました。

(星野)

コイルを使う人のための話(第3回)

●はじめに

第3回目の今回は、「コイルのインダクタンス」についてです。毎回の内容が、うまくつながらないかも知れませんが、コイルのことを知る上でお役に立てれば幸いです。

●巻線型コイルのインダクタンス

第1回目で、コイルは電線を巻いたものだと話をしましたが、コイルのインダクタンス(L)と巻線の巻数(N)の関係は、概ね次のようになります(インダクタンスは、巻数 N の 2 乗に比例します)。

$$L = k \times \mu e \times N^2 \quad (\text{H:ヘンリー})$$

但し、k : 形状などで決まる常数
μe: 実効透磁率

巻線型コイルの場合、巻数が 2 倍になるとインダクタンスは 4 倍になってしまいます。最近のように、低インダクタンスのコイルの場合は、巻数も少ないのと巻数は整数にしかならないので、巻数を 1 回増減するだけでインダクタンスの値が大きく変化します。

例えば、5 回(5Turn)巻いた時のインダクタンスが 4.7 μH になるインダクタの場合、巻数ごとのインダクタンスの値は、表-1 のようになります。

この場合だと、10.0 μH が中心値になるインダクタンスは作れないこととなります。

参考までに、弊社の CER8042B(写真-1)の場合だと 11T で 6.8 μH になります。

表-1 巻数とインダクタンス

巻数(N)	インダクタンス(L)
5T	4.7 μH
6T	6.8 μH
7T	9.2 μH
8T	12.0 μH

セットメーカーの技術者の中には、上の式をご存じで「巻数、あと1T 減らしてインダクタンスを〇〇にした、サンプルをお願いします」なんて方もいたりします。



写真-1 CER8042B

インダクタを開発する時には、巻数とインダクタンスの関係が、T 度 E6 または E12 シリーズに出来るだけ合うように、苦勞して形状を決めているのです。

巻線型のインダクタの場合、特注でインダクタンスを標準外に設定(巻数を変更することで)することも可能なのですが、インダクタンス値によっては、絶対にできない場合もあるのです。

●実効透磁率について

空芯コイルに磁性材料を追加しても、実際のインダクタンスは材料の透磁率の倍数には増えません。これは、コイルから発生した磁力線が全て磁性材料の中を通らないことが原因です。そこで、実際にインダクタンスが何倍になるかの目安として、実効透磁率と言うのがあります。

磁力線の通り道に空間(エア・ギャップ)があると、実効透磁率は大きく低下します。このため、磁性材料単体の透磁率が非常に大きい材料を使用しても、実効透磁率は思ったほどは大きくなりません。従って、インダクタを小型化しようと思って透磁率の高い材料を使用しても、限界があるのです。

●ギャップについて

前回お見せした、7G17Dの仕様(表-2)ですが、温度上昇許容電流の値が全て同じだったのは、実は直流抵抗が同じだったからなのです。そうです、直流抵抗が同じと言うことは、中の巻線が全て同じと言うことなのです。

表-2 7G17Dの仕様の一部

品番	インダクタンス (μH)	直流抵抗 (mΩ) max.	直流重畳許容電流 (A)	温度上昇許容電流 (A)
7G17D-100M	10±20%	10.7	26.0	8.2
7G17D-220M	22±20%	10.7	13.0	8.2
7G17D-330M	33±20%	10.7	7.5	8.2

では、どうやってインダクタンスの値を変えるかと言うと、インダクタの形状や巻数を変更しなくても、μ_r(実効透磁率)の値を変えることで、インダクタンスの値を変えることができます。

実際には、磁性材料のフェライトコアの一部にギャップ(隙間:図-1)を設けて行います。ギャップを設けることで、フェライトコアの材質を変更することなく、実効透磁率(見掛け上の磁気特性)を変更することができます。

但し、ギャップの大きさで変化するのはインダクタンスだけではなく、直流重畳特性も同時に変化します。

ギャップの大きさと、インダクタンス、直流重畳特性の関係は、下のグラフ-1のような関係になりますので、両方のバランスを見ながらギャップの大きさを決めます。

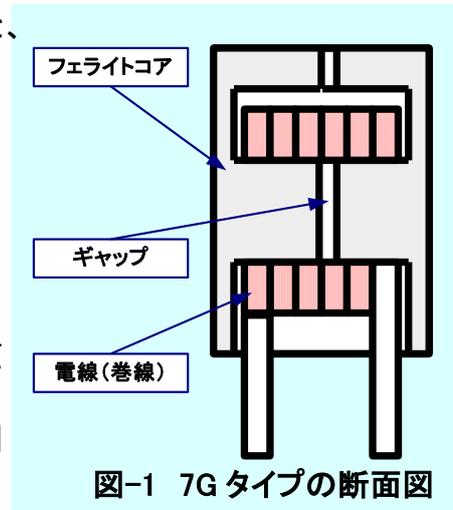
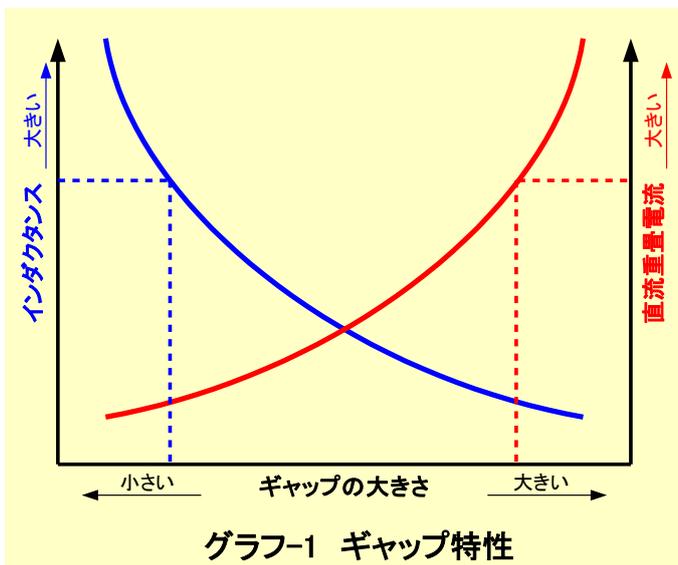


図-1 7Gタイプの断面図



グラフ-1 ギャップ特性

改めて表-2を見て頂くと、右図のようにになっているのが分かってもらえると思います(インダクタンスの大きい方が、ギャップが小さい)。

「損失を減らすためには、電線の巻数を減らして抵抗を下げ、ギャップを狭くしてインダクタンスを増やして、そうすると直流重畳電流特性が低下して...、困ったな~!」

ということになって、インダクタの構造のどの部分に、どう言ったギャップを設けると一番良い特性になるのか、ここがコイル・メーカーの腕の見せ所になります。

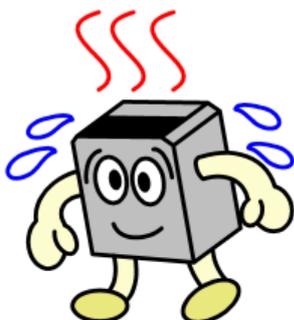
(星野)

コイルを使う人のための話(第4回)

●はじめに

第4回目は「インダクタと発熱」についてです。多くの電子部品が、発熱による制限から使用することができる電流値の規格が存在します。コイルも同じように制限を受けます。

●発熱すると何が問題か



一つはコイルに使用している電線の樹脂皮膜(一般に、耐熱温度区分 E 種:120°C, F 種 155°C, H 種 180°Cなどを使用)が、熱で劣化しショートする可能性が増加します。また、接着剤を使用しているコイルでは、接着剤の劣化によりコイルが破損する可能性が増えます。

もう一つは、フェライト・コアのキュリー温度(パワーインダクタの場合は、通常 200°C以上あります)を越えると、磁気特性が消失してインダクタンスが激減します(こちらは、温度が下がれば元に戻ります)。

コイルも、一般の電子部品同様高温下に長時間さらされると劣化が進みます(電解コンデンサのように早くはないです)ので、温度が上がり過ぎないようにお願いします。

最悪の場合、温度が上がり過ぎて「コイルを固定しているハンダが溶けてしまい、プリント基板から脱落」なんてことも起こらないとは限りません。

●コイルの発熱の原因

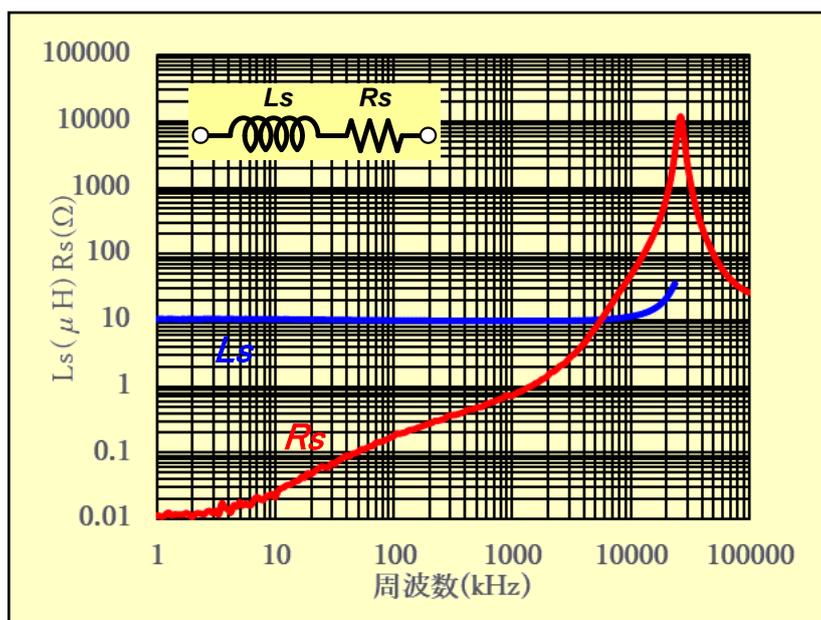
巻線型のコイルの場合、まずは電線の抵抗分による損失で発熱します。コイルに流れる電流が直流電流の場合は、これだけですが交流電流の場合は、これ以外の損失(電線の表皮効果と磁性材料の損失)が生じ発熱します。

コイルの等価回路を $Ls + Rs$ として表した時、弊社パワーインダクタ(CER1277B-101)の周波数特性はグラフ-1 のようになります。フェライトコアを使用したインダクタの場合、ほとんど同じような傾向にあります。

コイルに流れる電流が、交流分を含む時は、直流抵抗だけでなく交流(高周波)の損失分も考慮しておく必要があります。

但し、発熱は損失に比例(=電流の2乗)するので、コイルに流れる電流の直流と交流の比率が 10:1 とすると、 Rs の値が 100 倍違って初めて、直流と交流の発熱が等しくなる計算になります。

コイルの発熱が予想外に大きい場合は、コイルに流れる電流波形を確認してみた方が良さそうです。



グラフ-1 インダクタの周波数特性

$$P = I^2 \times R$$

●電流値の規格は電線の太さでは決まらない

一般に配線に使用する場合は、電線の太さは太い方が電流をたくさん流すことができます。巻線型のコイルの場合も、電線の太さを大きくすれば直流抵抗が減るので発熱が減り、大きな電流を流すことができます。

但し、太さ□□mmの電線を使用しているから□□アンペア(A)の電流を流すことができると、一意的に決まる訳ではありません。

流すことができる電流が制限を受けるのは電線の太さではなく、電流を流すことによる発熱が原因だからです。細い電線でも、熱が逃げる構造になっていると、見掛けよりも大きな電流に耐えることができます。

参考として、弊社のチップインダクタ(C2012CB)とパワーインダクタ(7E06LB)の例で比較をしてみました。表-1の値からも分かるように、同じ許容電流値でも電線の太さが3倍も異なります。これは、断面積にすると9倍も違うということです。

パワーインダクタの方が、電線が太いのに許容電流値が低いのは、コイルで発生した熱が逃げにくいということが原因です。そう言えば、半導体のワイヤーボンディング線も、パワー用でも結構細かったと思います。



表-1 C2012CBと7E06LBの比較

タイプ名	インダクタンス	直流抵抗 (mΩ) max.	温度上昇許容電流(mA)	電線径φ (mm)
C2012CB-15N	15nH	170	600	0.05
7E06LB-470	47uH	610	610	0.12

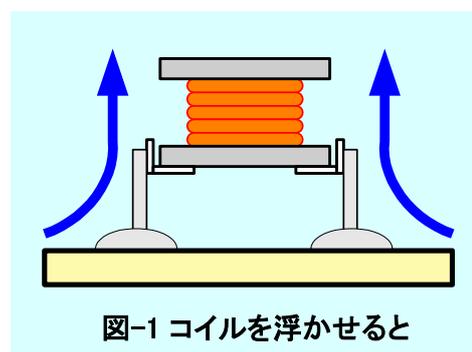
●コイルの温度は実装方法でも変わります

コイルで発生した熱は、コイル表面の空気を伝わって逃げるもの(空気の対流)と、コイルの接続部分から逃げるもの(熱伝導)があります。

特に、コイルの熱が端子からプリント配線板のランドパターンへ伝わる熱は、ランドパターンの大きさで変化するので、コイルの温度が大きく変わります。従って、ランドパターンを利用して(大きくする)放熱することで、コイルの温度上昇を下げることも可能です。

また、プリント基板が水平に設置されるか、垂直に設置されるかでも空気の流れが変わるので、コイルの発熱が変わることがあります。

極端な話ですが、試作時に図-1のような仮ハンダ付け状態で評価すると、正式に基板に実装した時よりも温度が下がることがあります。



(星野)

コイルを使う人のための話(第5回)

●はじめに

第5回目は「コイルのQ」についてです。Qと言っても、パワーインダクタを主にお使いの方には、なじみが少ないかも知れませんが、高周波用のコイルでは重要なパラメータの一つになっています。

●Qって何

理想状態のコイルとの違い(損失の量)を表すパラメータの一つで、コイルの等価回路を図-1で表した場合に式-1で計算されます。従って、「Qが大きい(高い)=損失の少ない理想に近いコイル」と言うことになります。 $r_s = 0$ で $Q = \infty$ になります。

昔は、Qメータ(コイル・メカの必需品でした)と言うのがあって、これでQを測定していたのですが、今は高性能LCRメータ(またはインピーダンス・アナライザ)の測定モードを「 $L_s + Q$ 」に設定することで測定することができます。

$$Q = \frac{2 \times \pi \times f \times L_s}{r_s} \quad \text{式-1}$$

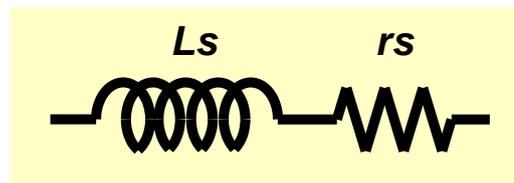


図-1 コイルの等価回路

Qは、同じコイルでも周波数によって大きく変化します。通常、周波数を低い方から変化させて行くと、ある周波数でQの値は最大値になり、それ以降の周波数では、低下していきます(次ページのグラフ-1のリッツ線の特性が一般的なカーブになります)。

●QとESR

パワー用途では、コンデンサの世界でも $\tan \delta$ ではなく、等価直列抵抗(ESR)を使用している場合が多いのと同じで、パワーインダクタもQではなくDCRが採用されています。損失に関しては、抵抗の方が直感的に分かり易いと言うことでしょう。それ以外に、DCRの方が測定し易いというのもあります。

Qも r_s (ESR)も、意味としては同じで式-1で相互に変換できます。

●表皮効果とリッツ線

同じ形状でDCRは大きいのに、周波数を高くしていくと、Qが高くなるコイルがあります。

表皮効果というのがあるって、電線の中を流れる電流は周波数が高くなるほど、図-2のように電線の表面の一定の深さに集中して、それよりも深い部分には流れにくくなります(太い電線ほど無駄な部分ができる)。

結果、トータルの電線の断面積は小さくても、表面積の大きな電線を使用することで、電流の集中を分散しようという方法です。実際には、個々に絶縁された細い線を束にして1本の電線(リッツ線と呼ばれています)として使用します(細い線だと、中心部にも電流が流れる)。

実際どの程度効果があるのか、同じフェライトコアに単線とリッツ線を巻線したコイルの特性の一例をグラフ-1に示します。グラフからも分かるように、リッツ線も万能と言うことで

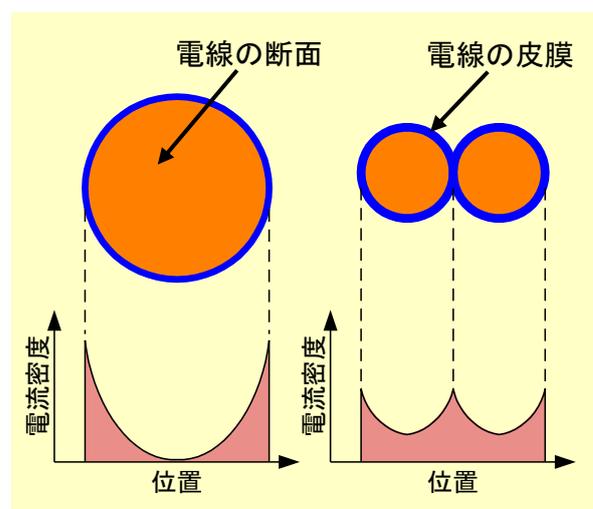
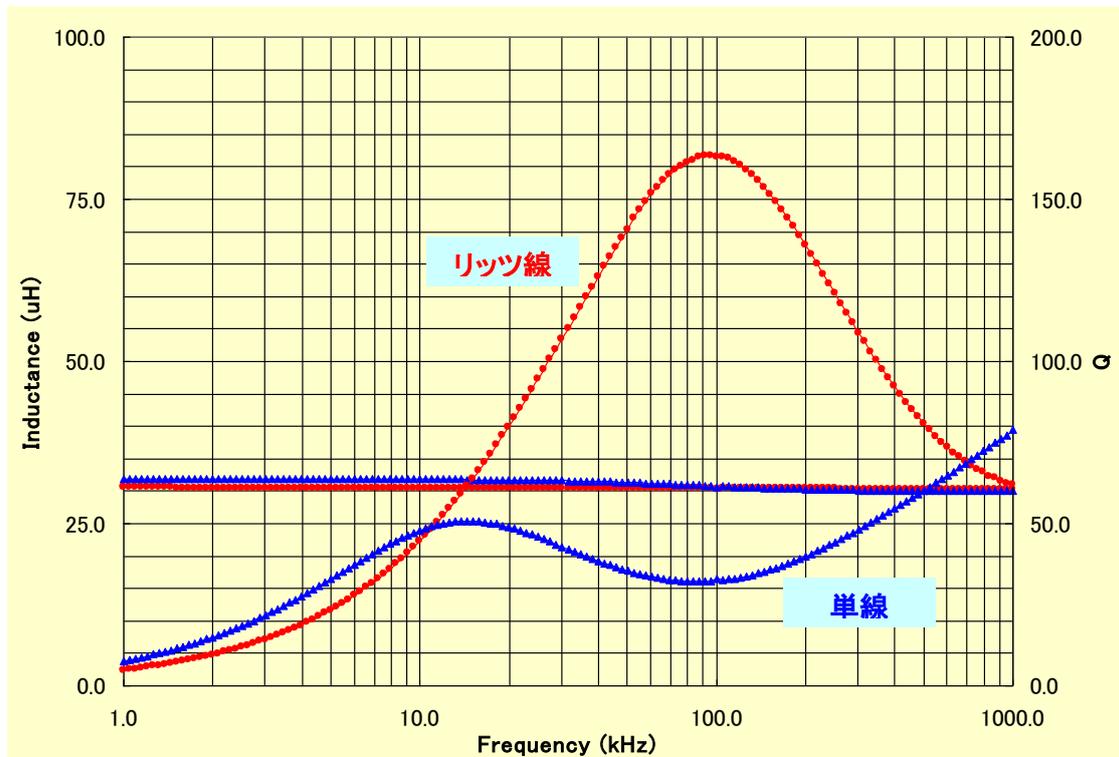


図-2 表皮効果の例

はなく、効果が期待できる周波数範囲が限定されます。コスト対効果を考えると、利用できる場所も限定されてしまいます。

その昔、AMラジオのアンテナコイルのQを上げるために良く使用されていましたが、最近では半導体の感度が上がったこともあって、ほとんど使用されなくなりました。



グラフ-1 電線に違いとQ特性の違い

●Qを高くするために

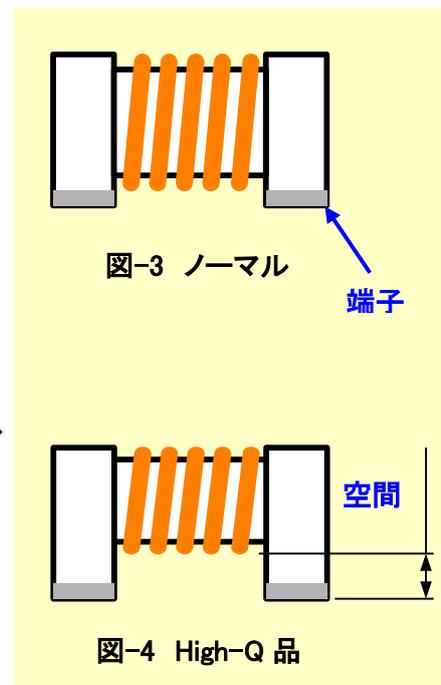
コイルの周囲に金属(導体)があると、一般にQの値が低下します。これは、コイルから出た磁力線が金属を通過する時に発生する渦電流(詳しくは後日記載)が、主な原因です。

高周波用インダクタの場合は、次のような工夫をしてQの高いインダクタを実現しています。

- ①コイルの金属端子の部分から、巻線を遠ざける。
- ②プリント配線板に実装された時に、巻線がパターン(銅箔)からできる限り離れるようにする。

チップインダクタの High-Q 品(弊社 C2012H)の例では、図-4 に示すように空間部分を大きくしています。この結果、ノーマル品に対して巻線部分が減少するので、生産可能な最大インダクタンスは小さくなりますが、同じインダクタンスであれば、Qを高くすることができます。

チョツとしたことですが、こう言ったことの積み重ねで、コイル特性をアップを行っています。



パワーインダクタの場合でも、開磁路インダクタの場合は、高周波用インダクタほどではありませんが、プリント配線板のパターン(銅箔)がコイルの真下にある時などは、影響を少なからず受けることがあります。

●ギャップの件(第3回の補足)

第3回でギャップの話をしました。追加で説明をします。

フェライト・コアと巻線が同じ条件で、ギャップ寸法だけ変えた場合(図-5 参照)は、下のグラフ-2のような関係になります。インダクタンスと直流重畳電流の関係は、相互に依存した関係にあります。

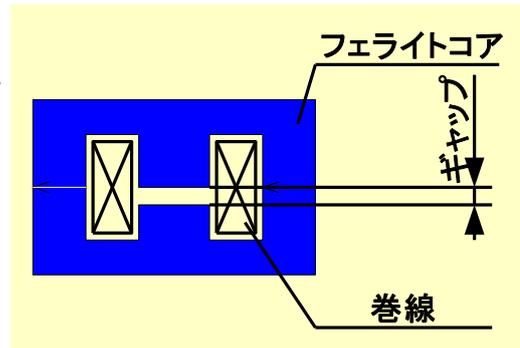
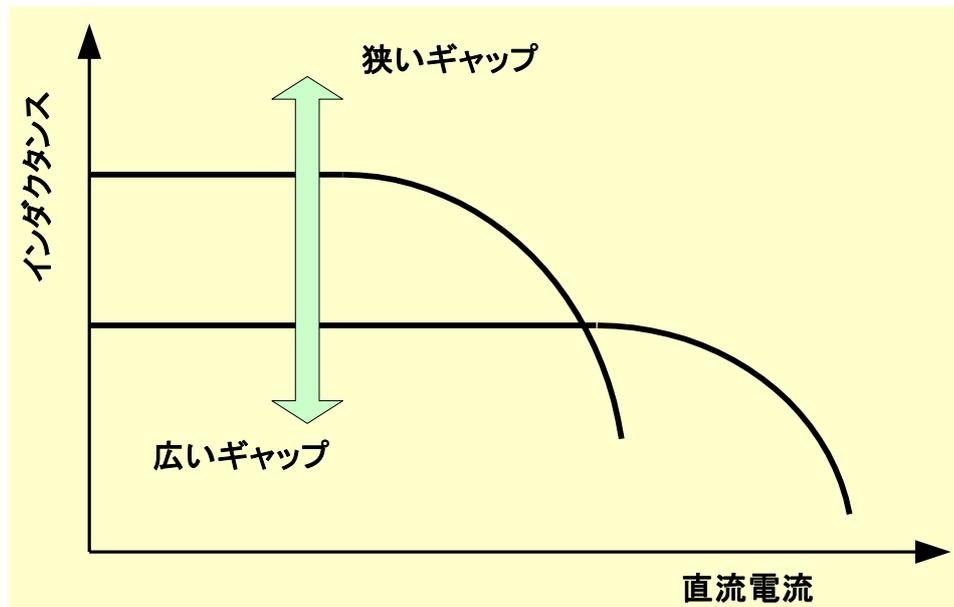


図-5 ギャップの位置



グラフ-2 ギャップと特性の関係

インダクタンスを大きくしたい場合、ギャップ付きのインダクタであれば、ギャップを狭くすることで対応できれば、DCRを増加させないで実現できます。でも、実際にはギャップを変更してインダクタンスを変更できるのは、形状(構造)の関係で限られたインダクタの場合だけです。

(星野)

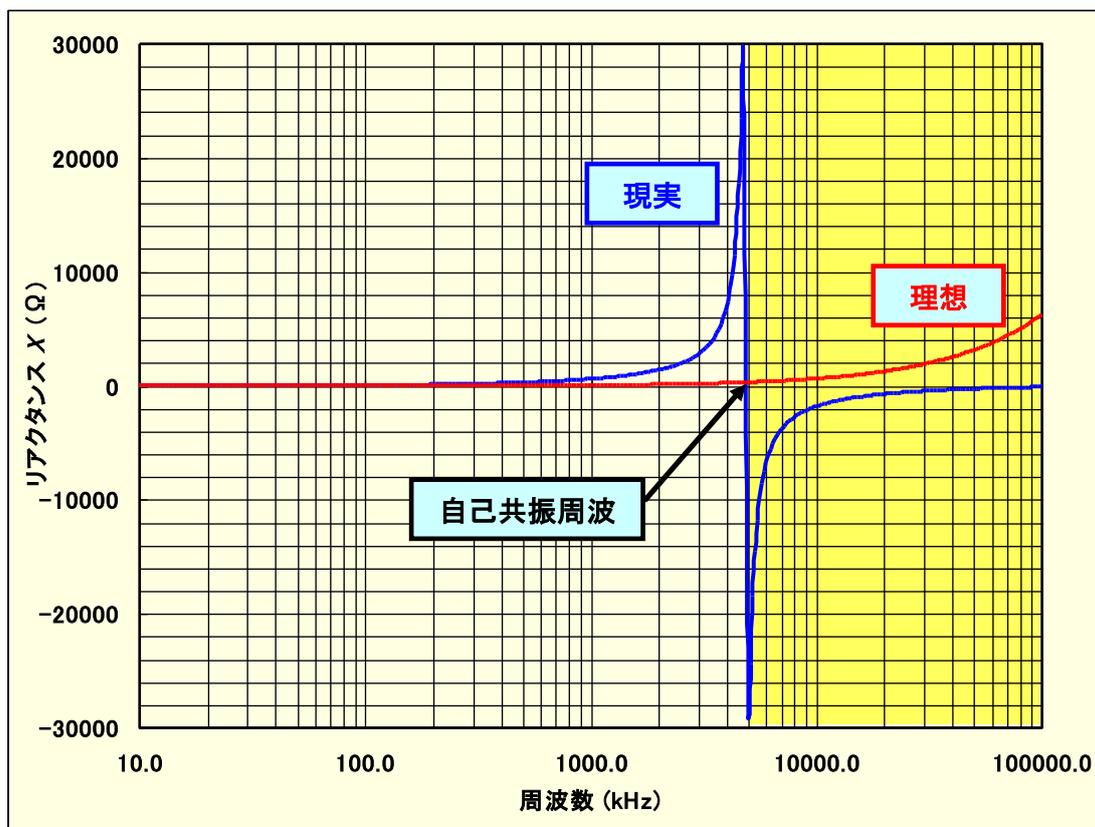
コイルを使う人のための話(第6回)

●はじめに

第6回目は「インダクタの自己共振周波数」についてです。現実の部品は、色々と理想の状態とは違って、予想外の特性を示す領域もあるものです。

●自己共振周波数って？

通常インダクタのインピーダンスの周波数特性($Z=R+jX$)を測定すると、グラフ-1(jX だけをプロットしてあります)の青い線のようになります(グラフは、弊社 CER1277B の100 μ Hの場合)。ちなみに、赤い線は理想状態の100 μ Hの周波数特性を示しています。グラフ-1の特性で、インピーダンスの極性が反転(インダクタが共振していることを示しています)する周波数を、自己共振周波数(Self Resonant Frequency:SRF)と言います。



グラフ-1 インピーダンス(X)特性

●自己共振の発生原因は

現実の世界では、広さ(大きさ)があれば容量分(コンデンサ)が発生します。この容量のことを、寄生容量、分布容量、浮遊容量、ストレー容量などと言います。

この結果、現実のインダクタの等価回路は、図-1のように並列に容量分(コンデンサ) C_p を加えるのが一般的です。

この容量 C_p とインダクタ自身のインダクタンス L_s が並列共振を起こし、グラフ-1のような周波数特性になります。

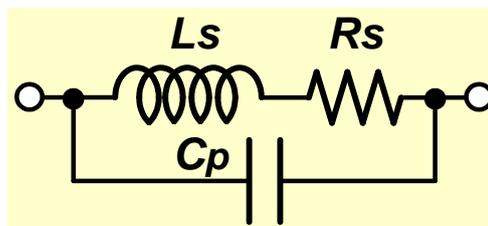


図-1 等価回路

通常インダクタスだけでは共振現象は起こりませんが、並列にコンデンサを接続しなくても、自分自身だけで共振現象が起きることから、自己共振周波数(SRF)と呼ばれてます。

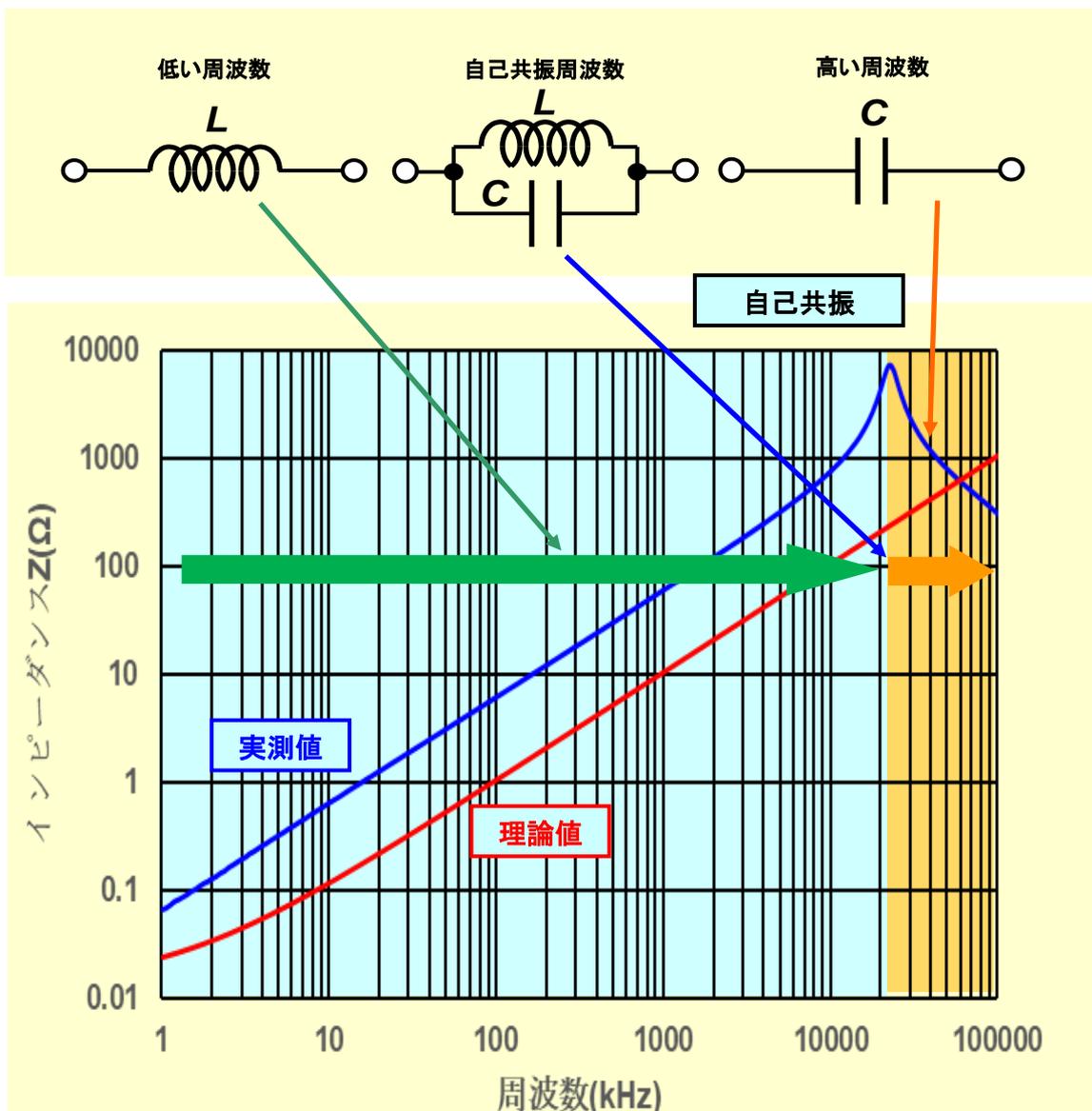
自己共振現象を避けることはできませんが、コイルの構造を工夫することで C_p の値を小さくして、自己共振周波数の値をより高い周波数へ移動した特殊なコイルも存在します。

●インダクタなのにコンデンサ？

インピーダンス($Z=R+jX$)のリアクタンス(X)分の極性が、プラス(+)¹の時は誘導性(インダクティブ)で、マイナス(-)の時は容量性(キャパシティブ)であることを示しています。

従って、グラフ-1の自己共振周波数より低い周波数領域ではインダクタですが、自己共振周波数より高い周波数領域(濃い黄色の部分)ではコンデンサとして機能していることになります。自己共振周波数よりも高い周波数では、もはやインダクタとして機能しないのです。

大雑把なイメージとしては、下図のようになるでしょうか。理論上インダクタの場合は周波数が高くなるほどインピーダンスが大きくなり、信号が通過し難くなるのですが、実際のインピーダンス特性(Z をプロット)は、グラフ-2(赤い線は理想インダクタの場合)のように、自己共振周波数で最大値になり以降は減少していきます。



グラフ-2 インピーダンス特性と周波数に対する回路の変遷

●現実のインダクタの自己共振周波数は

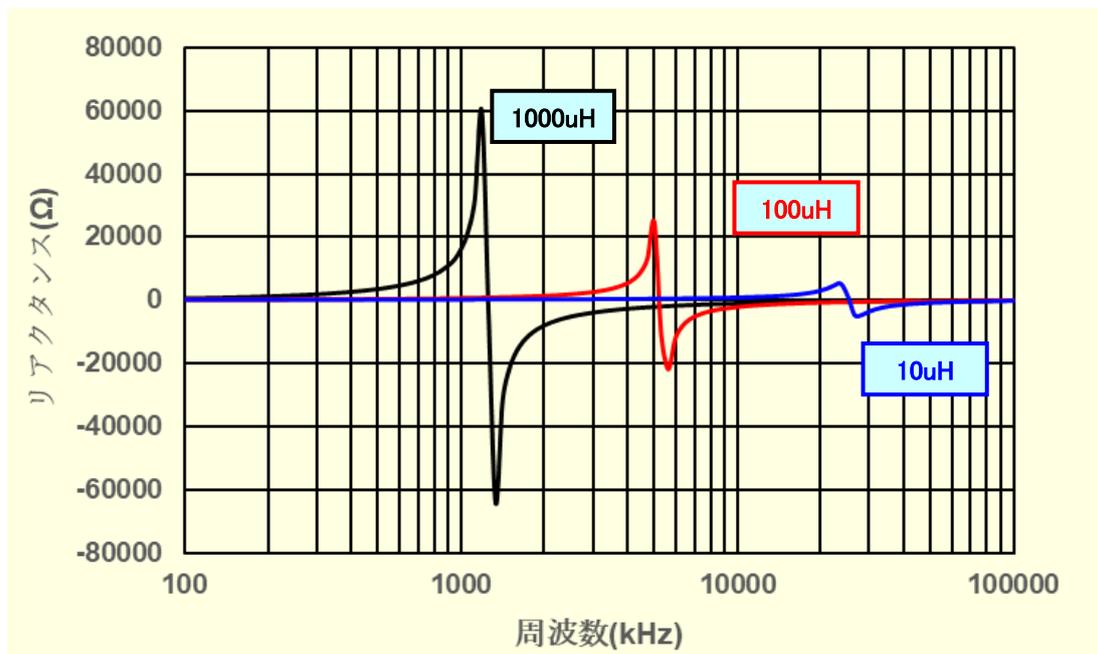
弊社のパワーインダクタ(CER8065B)の、自己共振周波数とストレー容量(C_p)の測定値を表-1に記載しておきます。

一般に、ストレー容量の値は、インダクタンスに比例して増加するのではなく、インダクタンスの値ほどは大きく増加することはありませんが、インダクタンスの値が増加すると、ストレー容量も増加し、自己共振周波数も低くなります。

インダクタンスの違いによる、インピーダンス特性(SRFの位置)の違いをグラフ-3に示します。

表-1 自己共振周波数とストレー容量

インダクタンス L_s (μH)	自己共振周波数 (MHz)	ストレー容量 C_p (pF)
10	26.0	3.7
100	5.2	9.4
1000	1.2	17.6



グラフ-3 インダクタンスの違いによるインピーダンス特性

●自己共振周波数に関する使用上の注意点は

- 1) インダクタをプリント配線板に実装することで、配線に伴うストレー容量が増加しますので、インダクタ単体の時よりも自己共振周波数は低い方に移動します。
- 2) インダクタのストレー容量は比較的小さいので、実装によるストレー容量(プリントパターン間の容量)の増加の影響で自己共振周波数の値が大きく変化することがあります。
- 3) 通常、自己共振周波数の 1/10 以下の周波数であれば、この影響をほとんど無視することができます。
- 4) 自己共振周波数付近ではインピーダンスの値が増加しますので、上手く利用するとインダクタンス値以上の効果が期待できることがあります。但し、自己共振周波数は意図して作ってる訳ではないので、バラツキも大きく注意が必要です。

(星野)

コイルを使う人のための話(第7回)

●はじめに

第7回目は「コイルの開磁路と閉磁路」についてです。おかげさまで、予定回数12回の半分も終わり後半戦に入ることができました。

●コイルと磁力線

コイルに電流を流すと磁力線が発生します。問題なのは、磁力線が金属(導体)を通過すると、今度は逆に金属(例えば、プリント基板の銅箔部分)に誘導電流(渦電流)が発生することです。この電流は意図しない電流なので、時によって回路の動作に悪影響を及ぼすことがあります。詳しくは、次回の「磁気シールド」に記載することになります。

●閉磁路と開磁路

コイル(インダクタ)に磁力線は付きものですが、この磁力線がコイルの外部に漏れにくくした構造のコイルを、閉磁路構造(単に閉磁路とも言います)と言います。逆に、磁力線が外部に出たままのコイルの構造を開磁路構造と言います。閉磁路構造は、シールドタイプなどとも呼ばれています。

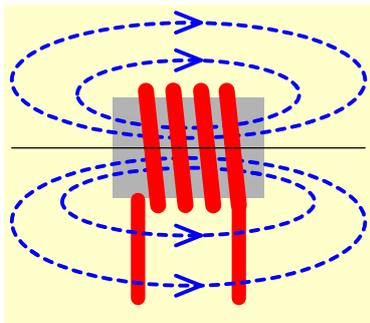


図-1 開磁路の場合

になるので、コイルの外に漏れる磁力線が少なくなります。

より確実にするには、コイルの側面以外も磁性体で覆うことで、更に磁力線の漏れを少なくすることができます。



写真-1
トロイダルコイル

あと、巻線が外から見えても閉磁路構造のコイルもあり、代表的なのがトロイダルコイル(写真-1)になります。

コイルで発生した磁力線は、コイル内のコアの中を通過することで、ループを形成し外に出ません。最近はセットの小形化が著しいので、隣接する部品同士の影響を避けるために、閉磁路コイルの方が好まれています。

コイルの磁力線は、図-1のようにぐるっと回ってループを作りますので、開磁路の場合はコイルの周囲に磁力線が大きくはみ出します。コイルを閉磁路構造にするには、巻線を磁性体で覆って見えなくしてしまい、磁束の通り道を磁性体で満たしてしまうことです。こうすることで、磁力線は磁性体の中を通り抜け、コイルの外に漏れなくなります。

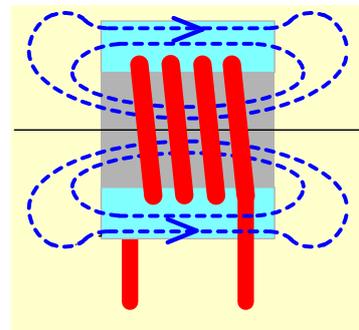
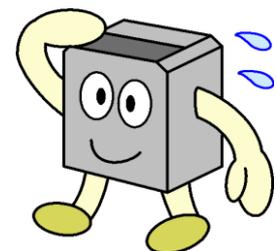


図-2 閉磁路の場合

僕も閉磁路だよ！



●閉磁路の定義？

部品の規格や業界内でも、どこまでが閉磁路と言う決まり(定義)みたいなものはありません。メーカーが「閉磁路」と宣言すれば、閉磁路コイルになります。

そんな状況なので、自社の製品を差別化するために「完全閉磁路」や「半閉磁路」みたいな言葉も出てきたようです。

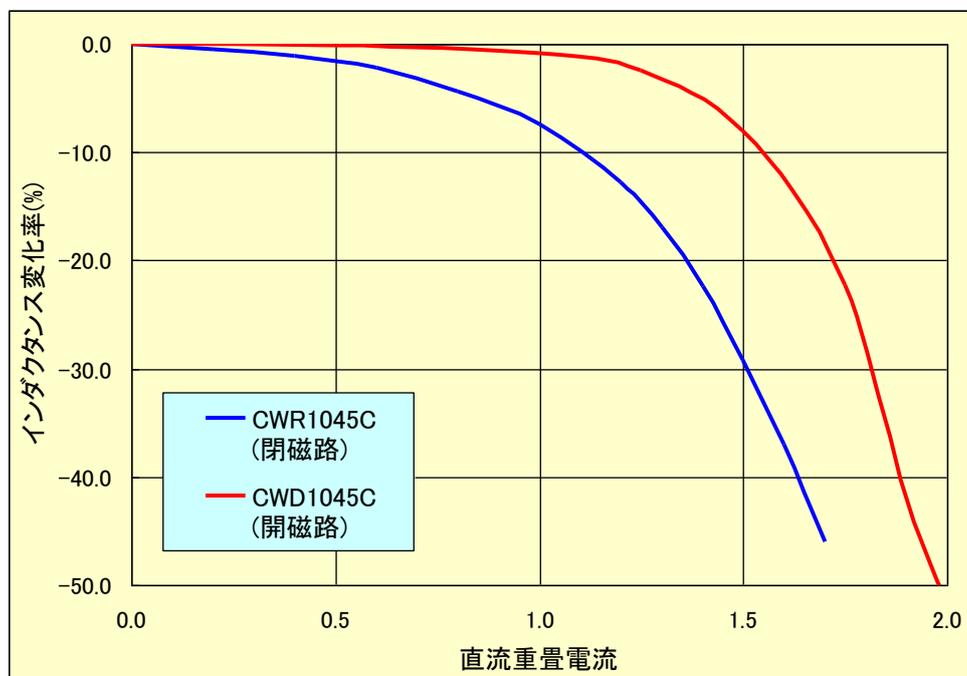
●特性の違いは

インダクタの場合、閉磁路と開磁路では直流重畳特性に違いが出てきます。これは、磁気構造の違いによるもので、閉磁路の方は、直流重畳電流の増加と共にインダクタンスが緩やかに減少して行く傾向にあります。

これに対して開磁路の場合は、直流重畳特性が伸びる傾向にあります。もちろん、使用している磁性材料の特性によっても、カーブの傾向は変化します。

グラフ-1は、弊社の車載用パワーインダクタ CWD1045C(開磁路インダクタ)と CWR1045C(閉磁路インダクタ)の、同じインダクタンスで特性比較したものです。開磁路の CWD1045Cは磁気構造が開いているので、磁気飽和が起こりにくいので直流重畳特性が伸びています。

*CWD1045C、CWR1045C 現在はラインナップしていない製品です



グラフ-1 直流重畳特性の違い

通常、開磁路インダクタに比べて閉磁路インダクタの方が、磁束が閉じ込められる構造なので実効透磁率(μe)が大きくなり、同じインダクタンス値の場合ならば巻数を少なくすることができます。但し、コイル形状(構造)の中で巻線することができる部分が少なくなるので、同じ巻数を巻く場合は、電線の太さを小さくする必要があります。この結果、直流抵抗(温度上昇電流も)に関しては両者の差は小さくなる傾向にあります(閉磁路は、巻数は減らせるが線径が細くなる)。

(星野)

コイルを使う人のための話(第8回)

●はじめに

第8回目は「渦電流と磁気シールド」についてです。

●磁気シールド

シールド(外部と遮蔽)を行うには、不必要な信号を「反射する」「吸収する」「迂回させる」方法があります。

磁力線(磁界)を遮断する磁気シールドは、図-1のように磁性体(磁力線は磁性体の中の方が通り易い)で周囲を覆うことで、磁力線を迂回(磁性体に集中)させて遮蔽します。

シールドは、外部と遮蔽するだけでなく、内部から不要な信号が出るのを防ぐこともできます。

閉磁路インダクタには、外部を磁性材料で覆う構造にして、コイル内の磁束が外部に漏れないよう磁気シールドされているものがあります。

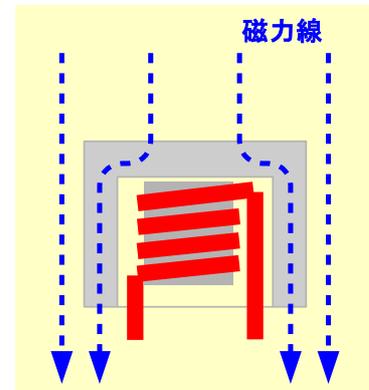


図-1 磁気シールド

●渦電流と影響

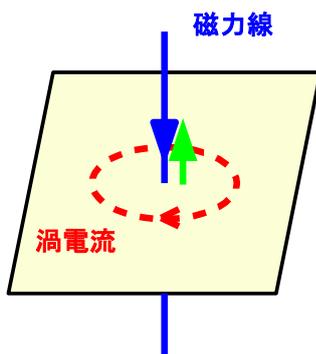


図-2 渦電流

金属を貫通している磁力線が変化(交流による磁界)すると、図-2のように元の磁力線の変化を打ち消す(図-2 緑)ように金属の表面に渦電流が発生し、その大きさは周波数に比例します(周波数が低い=磁束の変化が少ないので電磁誘導が少ない)。

また、導電率が高いほど電流が流れ易いので、銅やアルミニウムなどの金属材料の場合は渦電流も大きくなります。

渦電流の値は周波数に比例するので、低い周波数では打ち消しの効果は期待できませんが、高周波では効果が期待できるようになります。

また、磁力線を打ち消す方向に渦電流が流れるので、コイルの近くに金属を配置すると、渦電流による磁力線の打ち消し効果によりインダクタンスの値が減少したり、損失が増加(=Qの低下)します。

閉磁路インダクタの場合は、コイルの外に漏れる磁力線が、もともと少ない構造なので影響を受けにくいのですが、開磁路インダクタの場合は磁力線がコイルの周囲に出ているので、より影響を受けます。インダクタをプリント配線板に配置する時、グランド・パターンや筐体の金属部分が近いと、渦電流が流れて影響を受けることがあります。

●コイルに使う磁性材料

磁性体を使用することでインダクタンスを大きくすることができますが、磁性体の中を磁力線が通るので、磁性体に導電性(金属)がある場合は渦電流が発生します。渦電流が流れると特性が低下するので、一般にコイルに使用する磁性材料は、フェライトのような渦電流が流れない絶縁特性の物を使用します。

磁性材料として金属を使用し直流重畳特性を改善したパワー・インダクタがありますが、この場合も金属を粉末にして絶縁処理を施して粉体間に渦電流が流れないようにし、渦電流による損失が発生しないようになっています(図-3)。

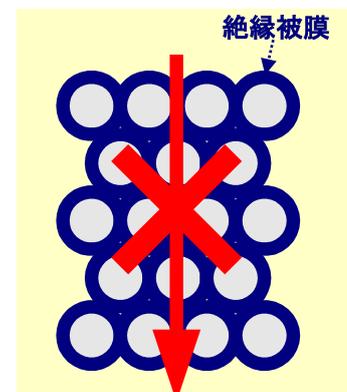


図-3 絶縁された金属間は電流が流れない

●電磁シールド

磁気シールドの場合は磁性体で覆うことでシールドを行いますが、渦電流を利用したシールドと言うのがあり、これは反射して遮断する方法になります。周波数が低いと渦電流が流れ難い(=シールド効果が小さい)ので効果が期待できませんが、周波数が高くなると渦電流により磁力線が打ち消されることを利用して、磁界のシールド(電磁シールド)を行うことができます。一般に、10kHz程度の周波数以上から、金属を使用した電磁シールドの効果が期待できるようになります。

この場合、シールドに使用する材料は磁性体ではなく、電流の良く流れる金属材料(銅・銅合金やアルミニウム)が使用されます。なお、電磁シールドの場合は金属をグランドに接続することで、静電シールドとしての効果も期待できます。

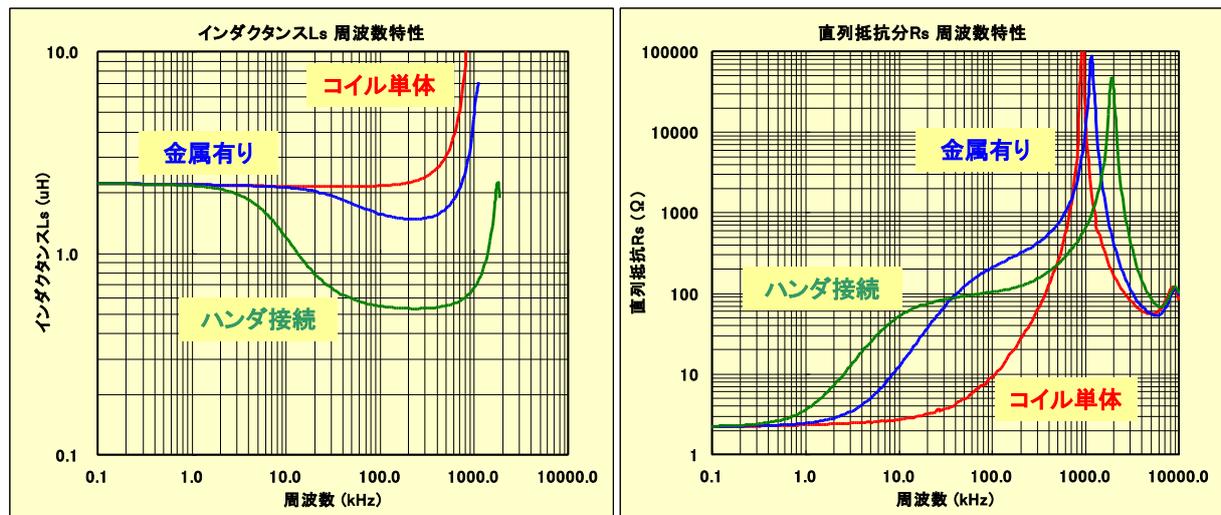
●電磁シールドの効果

開磁路インダクタの周囲を、厚さ0.1mmのリン青銅版で覆ったもので測定を行いました(写真-1)。コイル単体(赤線)、リン青銅板の端が接触しないようにした場合(青線)と、端をハンダで完全に接続(写真-1右)した場合(緑線)の特性をグラフ-1に示します。

両者で、渦電流の流れ方が変わるので、特性の変化も異なりますが、特に低い周波数では渦電流自体が小さくなるので、影響(=シールドとしての効果)が少ないことが分かります。電磁シールドの場合、接合部分を確実に導通させることが重要になります。



写真-1 評価したコイル



グラフ-1 金属シールドの影響

高周波用コイルでは金属ケースを使用してシールドしますが、パワー・インダクタで金属ケースを使用しないのは、開磁路インダクタの場合はシールド効果に対して電気的特性の性能低下(インダクタンスの低下と損失の増加)が激しいこと、また閉磁路インダクタの場合は、コスト増の割にシールドの効果が少ないからです。

(星野)

コイルを使う人のための話(第9回)

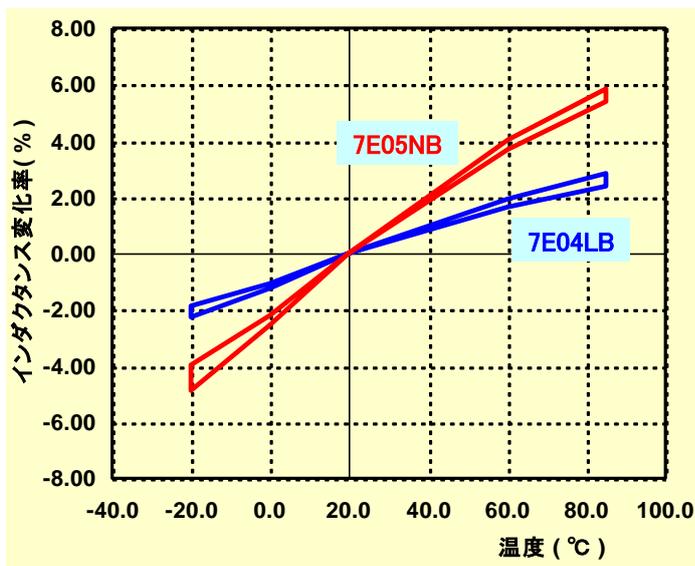
●はじめに

第9回目は、特性の中から残っている「温度特性と絶縁特性」についてです。

●インダクタンスの温度特性

多くのコイルは、磁性材料を使用して作られています。この結果、コイルの特性は磁性材料とコイルの構造(磁気構造)により大きく変化します。

磁性材料として多く使用されているフェライトコアの場合、透磁率(μ)はプラスの温度特性を持っているものが大半なので、インダクタンスの温度特性も一般にはプラス(温度が上がるとインダクタンスが増加する方向)になります。但し、同じ材質を使用してもコイルの構造が異なると、温度特性も大きく異なることがあります。



グラフ-1 温度特性例(7E04LB, 7E05NB)

グラフ-1は、弊社パワーインダクタ7E04LBと7E05NBの温度特性の測定例です。二つのコイルの構造はほとんど同じですが、フェライトコアの材質が異なることで、温度特性にも差が出ています。

パワーインダクタの場合、インダクタンスの温度特性よりも直流重畳特性の方を重視して開発されるので、結果として、このような差が出てしまうことがあります。

見た目が同じようでも、温度特性は同じとは限らないので、必要に応じて温度特性も確認するようにして下さい。

* 7E05NB 現在はラインナップしていない製品です

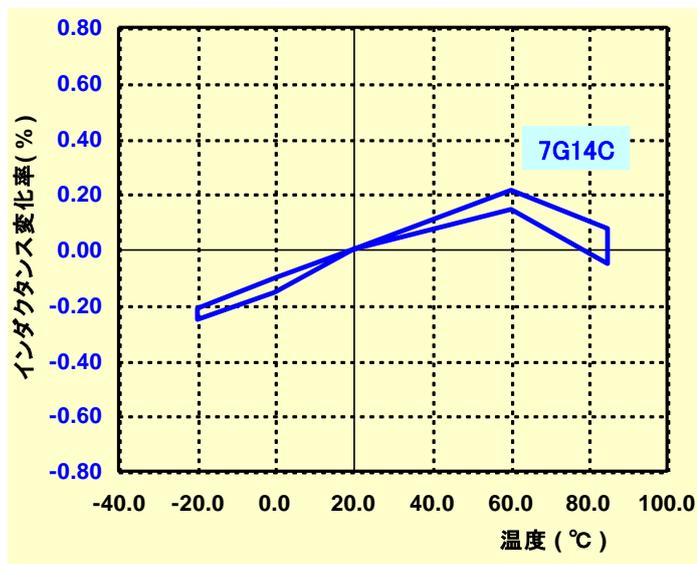
グラフ-2は、弊社デジタルアンプ用インダクタ7G14Cの温度特性の測定例です。ここで注意して頂きたいのは、グラフ-1と-2では縦軸の目盛り(青)が10倍違うということです。

7E04LB, 7E05NBと7G14Cは、どれも閉磁路インダクタですが、構造の違いにより「インダクタンスの温度に対する変化」が随分異なることを分かって頂けると思います。

意識して、温度特性を大きな値にしている訳では無いのですが。



写真-1

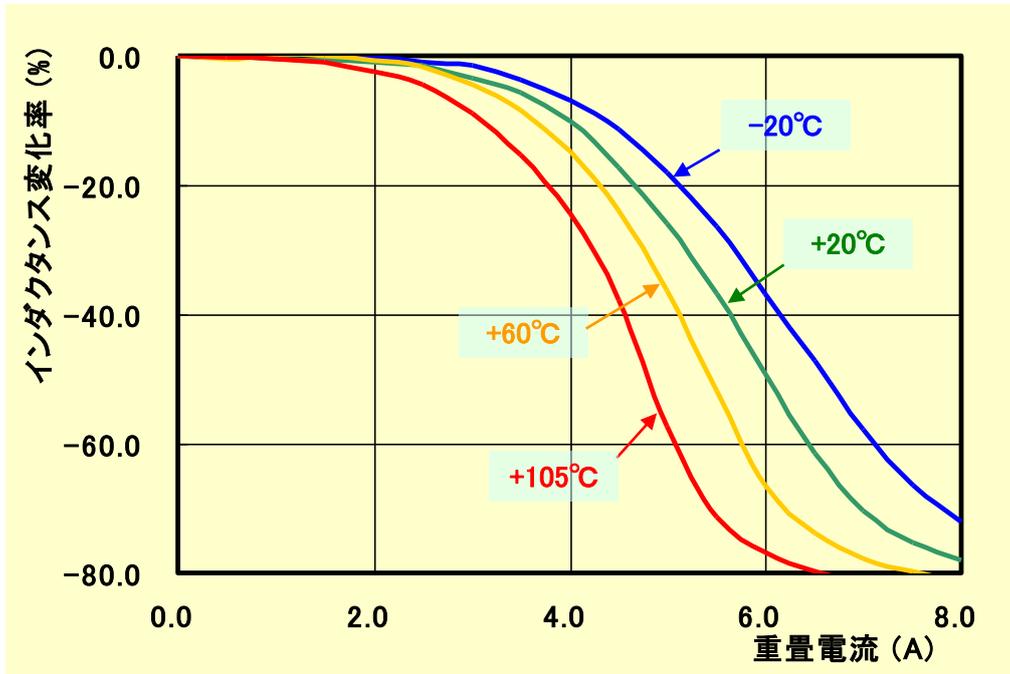


グラフ-2 温度特性例(7G14C)

●直流重畳電流の温度特性

パワーインダクタの直流重畳特性のカーブは、一般にグラフ-3(弊社 CER1042B の特性例です)のようにコイルの温度が上がると手前に来ます。その割合は、構造と使用しているフェライトコアの材質により異なりますが、傾向としてはグラフ-3 のようになります。

パワーインダクタは、電流が流れると自分自身が発熱するのと、比較的温度の高くなる場所で使用されることが多いので、高温下の特性の変化についても確認が重要になります。



グラフ-3 温度特性(直流重畳特性)

●絶縁抵抗

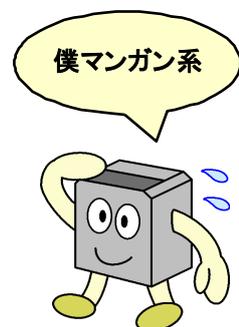
コイルに使用しているフェライトコアには、ニッケル(Ni-Zn)系とマンガン(Mn-Zn)系の2種類があります。磁気特性以外の違いで目立つのは体積抵抗率の違いで、ニッケル系の1,000,000 Ω・m に対して、マンガン系は0.1~10 Ω・m になりますが、金属の場合は更に小さな値の0.000000001 Ω・m 程度になります。

分かりにくいので、試しにマンガン系フェライトコアの表面の抵抗を測定してみました、「測定端子の間隔を5mm」にした時で約150kΩでした。

ニッケル系の場合は絶縁体と考えて問題ありませんが、マンガン系の場合、一般的な電圧範囲では殆ど問題無く使用可能ですが、一部の高電圧部分や、絶縁が重要な回路では対策が必要になります。

このため、マンガン系は用途によりフェライトコアの表面を絶縁処理して、ニッケル系と同等の特性を維持しています(弊社パワーインダクタ HER シリーズで採用)。

パワーインダクタにはニッケル系を、トランスにはマンガン系を使用することが多いのですが、一部のパワーインダクタには直流重畳特性を改善するために、マンガン系(絶縁処理して)も使用されています。



(星野)

コイルを使う人のための話(第10回)

●はじめに

第10回目は「コイルの働き(動作)」についてです。コイルの動作には、色々なモードがあるので、他の部品よりも分かり難いのかも知れません。

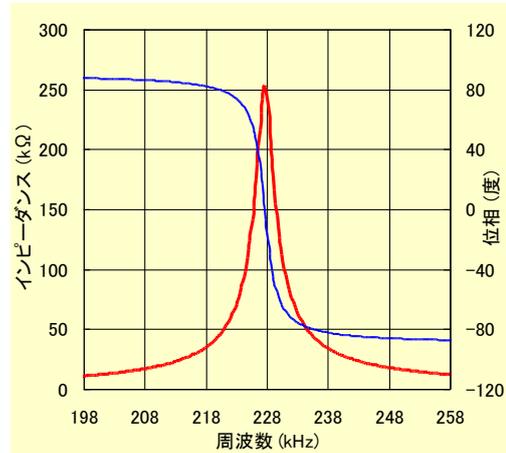
●インダクタンスを利用-1: 共振回路

コイル(L)とコンデンサ(C)を組み合わせることで、共振現象を起こします。並列共振回路の場合は、共振周波数で端子間のインピーダンスが最大(直列共振回路の場合は最小)になります。

これを利用して、特定の周波数を取り出したり、逆に取り除いたりすることができます。なお、共振周波数 f_x の値は、次の式で計算できます。

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

グラフ-1 は、 $L=2.2\text{mH}$ と $C=220\text{pF}$ で並列共振回路を作成してインピーダンス(赤)と位相(青)の周波数特性を測定したのですが、共振周波数は計算値 = 229kHz とほぼ一致しています。この場



グラフ-1 インピーダンス特性



写真-1 5CHH

合、コイルの Q が高いほどインピーダンス特性の山の形が鋭くなり、ピークのインピーダンス値も大きくなります。

共振周波数は、インダクタンスの値が±5.0%変化すると、約半分の±2.5%ほど周波数が変化します。従って、インダクタンス値のバラツキが重要になります。昔は、可変コイルと言ってインダクタンス値を可変できるコイルが、高周波回路では多用されていました。

写真-1 は SMD タイプの可変コイル(弊社:5CHH タイプ)ですが、上面の溝にドライバーを差し込んで回すことで、上部の磁性体が上下に移動しインダクタンスを可変(±数%~±10%程度)できます。

* 5CHH 現在はラインナップしていない製品です

●インダクタンスを利用-2: LC フィルタ

同じようにインダクタンスを利用したものに LC フィルタがあります。L.P.F(ローパスフィルタ:図-1 は 3 次の L.P.F) や H.P.F のように、共振回路の無い場合は、インダクタとコンデンサの値でフィルタの特性が決まりますが、共振回路の時ほどインダクタンス値が変化しても影響を受けません。

また、DC 電源のノイズ除去に使用する L.P.F.の場合は、インダクタのインダクタンスの最低値を考慮しておけば、大半の場合インダクタンス許容差が大きい製品でも使用できます。

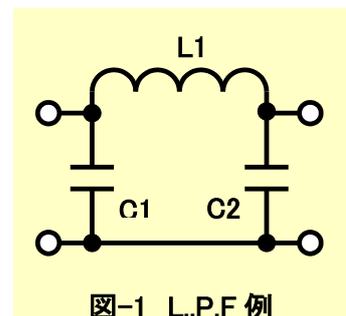


図-1 L.P.F 例

この場合、理論的にはインダクタンス値は大きい方が良いのですが、現実のコイルには直流抵抗と自己共振周波数が存在するので、必要以上に大きなインダクタンス値にすることは逆効果になります。

スイッチング電源に使用されているインダクタは、LC フィルタ用とエネルギー変換用がありますが、LC フィルタ用の場合は直流抵抗(高周波の損失は無視できます)だけが重要になります。

●エネルギーの蓄積効果を利用

コンデンサと同じように、コイルにも電気エネルギーを蓄えることができます。コンデンサは電圧素子なので分かり易いのですが、コイルの場合は電流素子なのでちょっと分かり難いです。電源からコイルに電流を流して蓄えてから、次に負荷に切り替えて電流を流すことを、繰り返して制御することでスイッチング電源ができあがります。

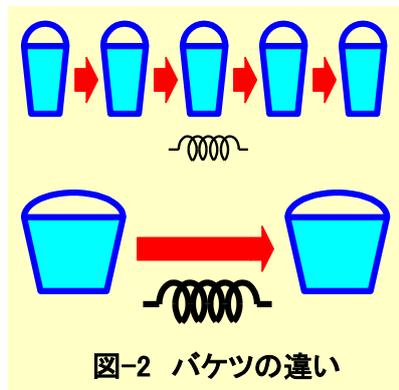


図-2 バケツの違い

一定量の荷物(出力条件が同じ)を運ぶのには、大きな入れ物で運ぶ回数を減らすのと、小さな入れ物で運ぶ回数を増やす方法があります(図-2 参照)。

スイッチング電源の場合に置き換えると、運ぶ回数が周波数に、入れ物の大きさがインダクタンスになりますので、最近のようにスイッチング周波数が高くなると、使用するインダクタのインダクタンス値も小さくて済むようになります(小形のインダクタが使用可能)。実際のインダクタンスは、出力の条件により異なります。

スイッチング電源の場合、インダクタンス値のズレは、ある程度は周波数でカバーできますが、それよりも損失抵抗は電源の効率に直接影響するので、コイルの損失(直流抵抗と動作周波数での抵抗分)が低いことが重要になります。

●磁力線(磁気結合)を利用

コイルは、磁気結合を利用することでコンデンサ他の部品ではできない動作ができます。複数の巻線を結合させたトランスは、低周波(主に電源回路)から高周波(主にインピーダンス変換)まで幅広く利用されています。写真-2は、高周波用バルントランス(弊社:4BMH)の例になります。



写真-2 4BMH

トランスの場合は、個々の巻線のインダクタンス値の重要性は低くなり(インダクタンスの最低値のみ必要な場合が多い)、代わりに巻線の結合状態や巻数比の方が、一般的に重要になります。

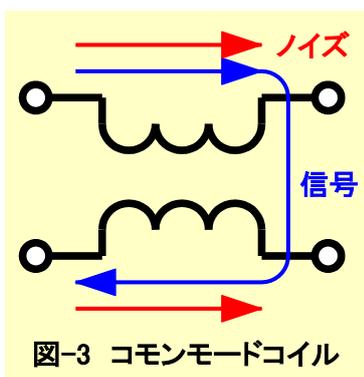


図-3 コモンモードコイル

磁力線を上手く利用したのに、コモンモードフィルタがありません。図-3のように信号(差動信号:青)とコモンモード・ノイズ(赤)の電流の向きが反対なのを利用して、信号に対しては磁力線が打ち消す方向に2個のコイルを結合してあります。この結果、信号に対しては影響しませんが、コモンモード・ノイズに対してはインダクタンスとして動作し、コモンモード・ノイズが通過するのを阻止するように働きます。

単純にインダクタを信号線に入れた場合に比較して、信号には影響しないでノイズに対してのみ影響するようになり、信号の劣化を少なくすることができます。

コイルは、使用する回路(=コイルの特性の何を利用するか)で、要求される(=重要度)電氣的パラメータが異なってきます。このことから、弊社で想定した用途に応じて一般仕様に記載する内容も製品により変えています。

(星野)

コイルを使う人のための話(第11回)

●はじめに

第11回目は「コイル間の結合」についてです。複数のコイルを並べた時の結合は、どうなっているのでしょうか。

●磁力線の向き

コイルから発生する磁力線の向きは、巻線の巻方向(右巻き、左巻き)とコイルに流れる電流(青矢印)の向きで決まります。

従って、図-1の(A)と(B)の場合では、巻方向と電流の向きが両方共に逆なので、磁力線の向きは同じになります。

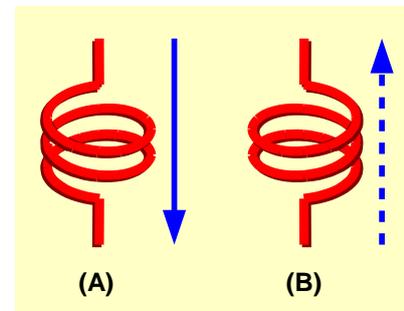


図-1 磁力線の向き

●インダクタの極性表示

コイルを2個以上配置する場合は、コイルから漏れ出る磁力線が互いに影響し合う場合があるので、製品によつては表面に写真-1のような極性表示があります。

通常のコイルの場合、物理的な「巻始め」が存在しますが、巻方向に関しては生産方法の都合で、全ての形状で同じとは限りません。

トランスなど複数の巻線を持つコイル(通常は全て同じ巻方向になる)の結合の方向を示すのに使用(外部に漏れる磁力線の方向は考慮されていない)されたものが、インダクタにも使用された関係で、現在のような物理的な「巻始め」の表示が一般的になっています。



写真-1 巻始め表示例

本来は、電解コンデンサの極性のように、電気的特性に合わせて表示を行うべきなのですが、コイルの極性表示に関しては業界内で標準が存在しないため、コイル・メーカー間で100%互換性があるとは言えない状況にあります。このため、コイルの仕様書には「巻始め」と合わせて「巻方向」が記載されている場合があります。

●コイルを並べて置いた場合

コイル同士の結合を確認するために、インダクタを2個横に並べて(図-3参照)測定しました。

図-2に示す測定回路でスペクトラム・アナライザのTGの出力を一方のインダクタ(L1)に加え、もう一方のインダクタ(L2)の出力(=入力電力)を測定しました。

この時、インダクタ(L1,L2)が無い状態で、入力電力の値が0dBmになるようにTGの出力を設定してあります。

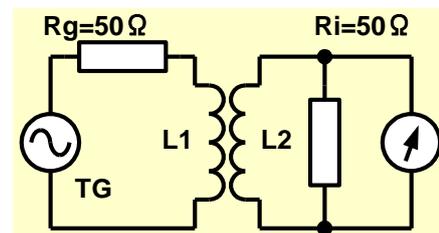


図-2 測定回路

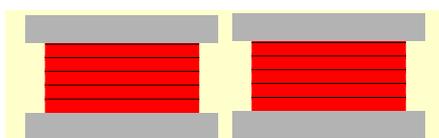


図-3 コイルの設置状態

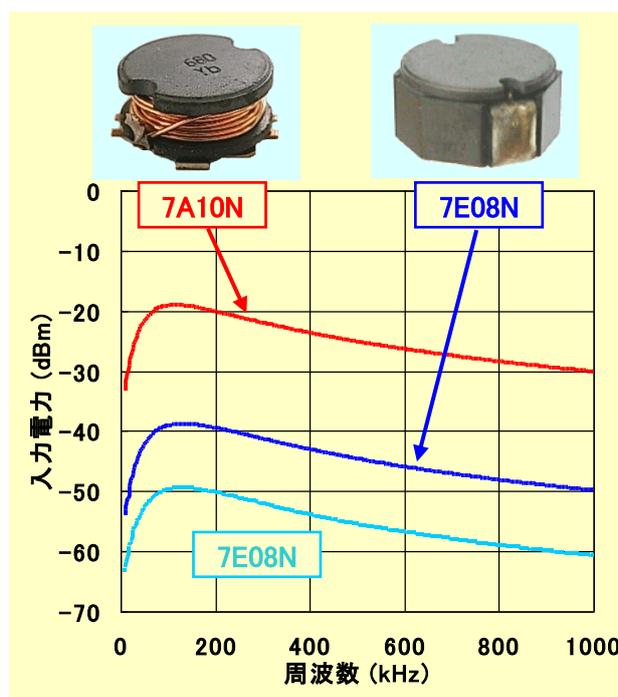
コイルが2個存在して、互いに結合しているということは、トランスと同じことになります。そのため、一方のコイルの電力の一部が他方のコイルに伝送されまいますが、トランスのように結合が強くないので、発生する電力は非常に小さくなります。

グラフ-1は、弊社の開磁路 SMD インダクタ(7A10N)と閉磁路 SMD インダクタ(7E08N)のコイル間の結合を比較したグラフです。

開磁路インダクタの場合でも、漏れ出た全ての磁力線が隣のコイルに入り込む訳ではないので、入力電力は減少(=結合が小さい)しています。閉磁路インダクタの場合は、磁気シールド効果により、開磁路インダクタと比較して、さらに約 20dB ほど減少しているのが分かります。

次に、閉磁路インダクタを外形寸法の約半分の 4mm ほど離して測定した場合は、さらに 10dB(水色)ほど入力電力が減少することも確認できました。

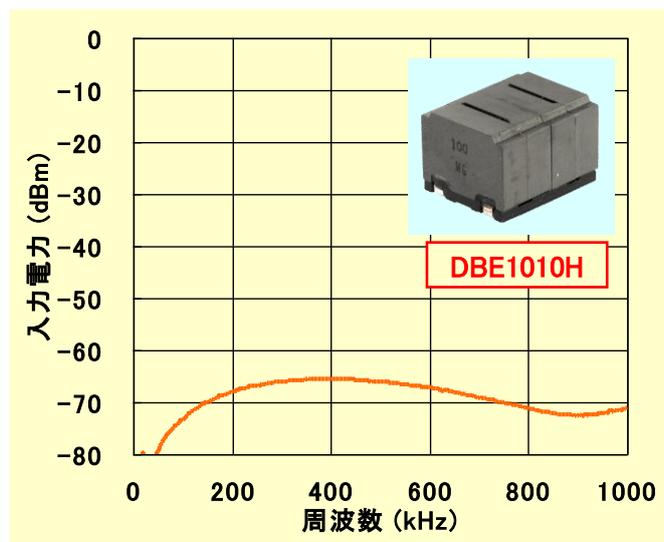
複数のコイルを近接して配置する場合は、閉磁路インダクタが効果的であることが、お分かり頂けると思います。



グラフ-1 7A10N と 7E08N 比較

* 7A10N、7E08N 現在はラインナップしていない製品です

●2 in 1 タイプ・コイルの場合



グラフ-2 DBE1010H の特性

弊社のデジタル・オーディオアンプ用のコイルには、2 in 1 タイプの製品が幾つかあります。これらの製品は、2 個のコイルを 1 個にまとめることで、実装工数の半減と実装面積の縮小を実現しています。

2 個のコイルを接近して並べることは、コイル間の結合が心配されますが、実際には個々のコイルのシールド効果が大きく、コイル間の結合は非常に小さな値になっています。

グラフ-2 は、弊社デジタルアンプ用 2 in 1 タイプの DBE1010H を測定したものです。通常のコイルを並べた時よりもコイル間の結合が小さくなっています。

●高周波の場合

高周波回路の場合は、インダクタンスが小さいので空芯コイルやチップインダクタが多用されています。この時、コイルを図-4 のように互いに直角になるように配置することで、コイルから出た磁力線は他方の巻線の輪の中を通りにくい方向になり、コイル相互の結合を最小にすることができます。

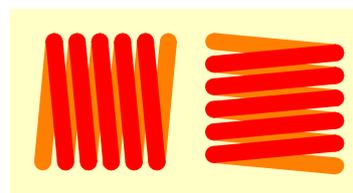


図-4 互いに直角に配置

(星野)

コイルを使う人のための話(第12回)

●はじめに

第12回目は最終回と言うことで「コイルを使用する時」についてです。

●コイルの動作を理解するために

同じ電子部品なのに、コイルがコンデンサに比較して分かり難いのは、コンデンサが電圧素子であるのに対して、コイルは電流素子だからかも知れません。

「電圧が同じならば使用可能」と言うのが一般常識になっているから、ごく普通の人にも「AC100V用の製品はAC200Vでは使用できない」くらいは理解されています。

では、この文章をお読みになっている皆さんは、次の①と②のどちらの表現が分かり易いでしょうか？。

- ①抵抗に電圧を加えると、抵抗に電流が流れる。 電圧 → 電流
- ②抵抗に電流が流れると、抵抗の両端に電圧が発生する。 電流 → 電圧

多分、①の方が分かり易いと思った人が多いと思います。そこで、コイルとコンデンサは電氣的に相反する関係にあるので、コイル(電流)の動作を考える時にコンデンサ(電圧)と対比して考えると分かり易いかも知れません。つまり、表-1のように、対になる内容に置き換えて考えます。

表-1

コンデンサ	コイル
電圧	電流
電圧源	電流源
並列	直列
直列	並列
オープン	ショート
ショート	オープン
$E = 0$	$I = 0$
$I = \infty$	$E = \infty$

図を使って説明すると、図-1の左の接続でSWをONにしてコンデンサの端子間に電圧を加えてから、電源を切り離し充電された状態にします。

その後でコンデンサの端子間を閉じる(SWを閉じる)と、図-2のように一瞬大きな電流(i)が流れます(実際に火花が飛んで、電気エネルギーが発生したことが分かります)。

同じことは、図-1の右の接続でSWをOFFにしてコイルに電流を流してからコイルをループ状に閉じて電流が流れ続ける状態にしてから電源を切り離します。

その後でコイルの端子間を解放する(SWを開く)と、図-2のように一瞬大きな電圧(e)が発生します(実際には放電が起こり、電気エネルギーが発生したことが分かります)となります。

このように、考え方を変えてみるとコイルもコンデンサも同じだと言うことが、何となく理解して頂けるのではないかと思います。やはり電圧の方が分かり易いでしょうか？

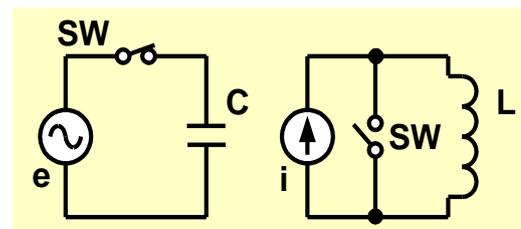


図-1 コンデンサ・コイルに充電

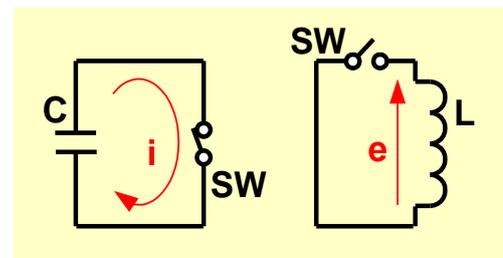


図-2 エネルギーの放出

●逆起電力の発生

上の文章で説明したように、コイルに電流が流れている状態の時に、スイッチやトランジスタなどで瞬時に流れている電流を遮断すると、コイルは電流を流し続けようとしてコイル両端に非常に高い電圧が発生します。

この現象を利用して高電圧を発生させる方法もありますが、コイルに流れている電流をON-OFFする回路の場合などは、発生する高電圧に対する保護回路などの検討も必要になります。

試作検討時など、ノイズ防止のために電源ラインにチョークコイルを入れたりした場合も、同じ状態になることがあるので注意した方が良いでしょう。

●周波数特性も

コイルもコンデンサも、周波数によりインピーダンスが変化し電気的特性が変わります。回路中のコイルの周波数特性も、コンデンサと対比して考えると、表-1を参考にして

「回路に直列(並列)に入れたコンデンサ」=「回路に並列(直列)に入れたコイル」が同じような周波数特性になります(図-3参照)。但し、根本的な動作が異なっている点は注意が必要です、

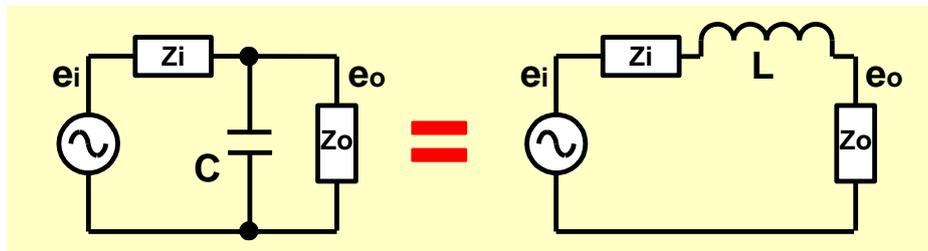


図-3 並列Cと直列L

●コイルの故障モード

巻線タイプのコイルの場合、故障の発生原因は色々ありますが、一番多い故障モードは「断線(回路がオープンになる)」になります。

また、条件の悪い環境下で使用する場合は、電線皮膜の絶縁劣化による巻線間のショートが発生することもあります。

断線は、一般のセットではコイルがオープン状態になり電流が遮断される方向なので、ショート状態になる部品よりは被害が少なく済むことが多いのですが、コイルの断線で別の部分が大きな影響を受ける場合があります。

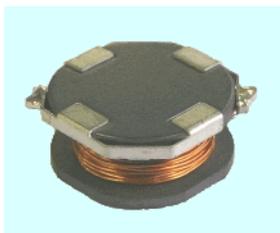


写真-2 CWD1242C



写真-1 CWR1277C

機械的な故障では「コイルの端子と基板のハンダ部分の剥離」があり、継続的に振動が加わるような場合で発生することがあります。

コイルを使用する装置が、故障に対して特に高い信頼性と安全性を要求される場合は、信頼性を考慮されたコイルを使用すると同時に、これらの故障モードについても考慮する必要があります。

写真-1,-2(写真-2は製品の裏面)は、車載用に開発された製品CWD・CWRシリーズですが、高い耐衝撃性と耐振性を確保するために4端子構造になっています。

*CWD・CWRシリーズ 現在はラインナップしていない製品です

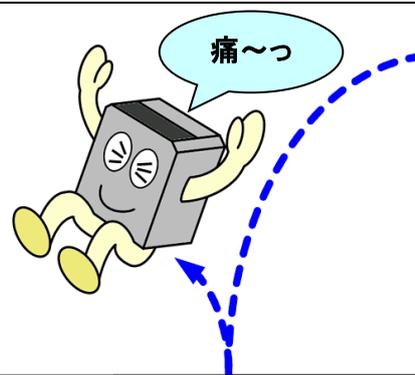
●衝撃を受けた部品

部品をうっかり床に落下させてしてしまうことは良くありますが、落下することで部品に衝撃が加わります。この時の衝撃の大きさは、床がコンクリートのように硬い場合は、短時間(数ms)ですが1,000G以上に達します。

コイルには、磁性材料としてフェライトコアが多用されていますが、フェライトはセラミック(瀬戸物)と同じで大きな衝撃が加わると破損してしまいます。

見た目に壊れていれば、落下した部品を使用することは無いのですが、拾って外観に異常が無いと、そのまま使用されてしまうことがあります。

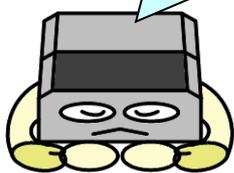
しかし、衝撃によりフェライトにクラック(亀裂)が入ることもありますので、コイルを供給する側としてはできる限り使用しないことをお願いしています。



落ちれば、コイルだって痛い！

●終わりに

ありがとうございました



第1部の全12回の連載も、無事に終了することができました。おかげさまで、予想以上に多くの方にお読み頂けたようで、大変ありがたく思っております。

また、仕事を進める上で、この連載が少しでもお役に立てば幸いです。

第2部も引き続きご利用頂ければと思っています。掲載内容のご要望も大歓迎ですので、宜しくお願いします。

●著者の紹介

星野 康男

1954年生まれ。コイルが専門のレジェンド・エンジニア。

1976年に相模無線製作所(現在のサガミエレクトロニクス株式会社)に入社。入社直後から技術部門に勤続。技術部長・役員を歴任し、顧問として仕事の手助け・後輩の指導を続け2024年3月末に退職。わかりやすい技術説明には定評があった。

趣味はカメラ📷。好きな動物は猫(と鈴虫)。

最後までお付き合い頂き、誠にありがとうございました。引き続き、サガミエレクトロニクスのコイルを宜しくお願い致します。



●お願い

この内容を作成するに当たり、記載内容には十分に注意を払っておりますが、もし記載内容に不具合な点、その他お気付きの点などありましたら、弊社ホームページの問い合わせフォームよりご連絡を頂けますと助かります。また、質問・ご意見などは、今後の参考にさせていただきます。



※許可無く無断転載、掲載することはお断りします。

©2008, 2009 サガミエレクトロニクス株式会社



サガミ エレク株式会社

20110701
20211210
20231011
20240401