

コイルの設計の仕方

1. コイルの形を決める

コイルを設計するとは、巻線仕様を決める作業になります。

巻線仕様とは、コイルの形や使用する電線の種類、巻数などを決めることです。

コイルの形としては下記があります。

- ・円筒形
- ・矩形（四角形）
- ・扇型
- ・それ以外の形（トロイダル型、サドル型など）

最も基本的な形は円筒形だと思います。

円筒形の巻線仕様の決め方が理解できれば、矩形や扇型も同じ手法で決められます。

トロイダル型やサドル型は、電線を積層する仕組みが分からないと、ややこしい形です。

ここでは、基本的な円筒形のコイルを設計するという前提で記述していきたいと思います。

2. 作りたいコイルの優先順位を決める

コイルを考える場合、どんなパラメータを優先または考慮するのか決める必要があります。

パラメータとは、

- ・抵抗値
- ・インダクタンス
- ・コイルの発生磁束密度（ソレノイドコイル、ヘルムホルツコイル）
- ・コイルの外形寸法
- ・直流電流を流すのか、交流電流を流すのか
- ・交流電流の場合、周波数はどれぐらいか⇒スキニング効果（表皮効果）により、より線か単線か
- ・より線の場合、素線径がどれぐらいで何本よるか
- ・上記のパラメータの中で複数の条件を満たす
- ・コイルの耐熱温度がどれぐらいか⇒電線の絶縁層の種類を決める
UEW : 130°C、PEW : 155°C、AIW : 200°C など
- ・ポビ`ン巻きか空芯コイルか⇒ポビ`ンを使う場合、その誘電率はどうか

などを考えます。

コイルを安全に使用するためには、

表面温度がどの程度上昇（ ΔT ）するのかを予測することも重要です。

3. 抵抗値を優先する場合

コイルの直流抵抗値は、

$$\begin{aligned} & [\text{コイルの平均径}] \times [\text{巻数}] \times [\text{電線の単位長当たりの抵抗値}] \\ & = [\text{使用する電線の長さ}] \times [\text{電線の単位長当たりの抵抗値}] \end{aligned}$$

で計算します。

単位長当たりの抵抗値は、JISや電線メーカーのカタログ等に記載されています。

なので、平均径と巻数を定めることがここでの作業となります。

平均径は、やみくもに定まるものでなく、内径あるいは外径を決めなければ算出できません。

コイルは、メカ的な機構部に取り付けられることを想定し、まずは内径と長さを優先します。

メカ的な寸法の制約から、内径は $\phi 10\text{mm}$ 、外径はフリー、長さ（厚さ） 10mm 未満とします。

そして、ほしい抵抗値は 3Ω で、耐熱温度が 110°C 未満にしたいとします。

耐熱温度が 110°C 未満なので、使用する電線は、2種UEWと決まります。

巻線仕様計算シートを使い、線径と巻数などの組み合わせで、 3Ω に近い巻線仕様を計算します。

そうすると、密着で巻線する場合、導体径 $\phi 0.3\text{mm}$ 、300ターンが良さそうです。

着目点は、長さ 10mm 未満で、電線を何ターン巻線できるかです。

2種UEWの導体径 $\phi 0.3\text{mm}$ の仕上がり外径は、 $\phi 0.3255\text{mm}$ です。

従って、

$$1\text{層の巻数} = 10\text{mm} / \phi 0.3255 = 30.72$$

となり、30.5より大きな数字なので、 10mm 未満で、30ターン巻線できることが分かります。

後は、抵抗値と比べながら巻数を増やしていくと、300ターンで約 3Ω になりました。

このとき、引き出し線の長さは 50mm としました。（巻始めと巻終わりを足すと 100mm ）

最終的に、巻線仕様は下記となります。

線材 2種UEW、導体径 $\phi 0.3\text{mm}$ （仕上がり外径 $\phi 0.3255$ ）

内径 $\phi 10\text{mm}$ 、外径 $\phi 16.2\text{mm}$ 、長さ 9.9mm

巻数300ターン

抵抗値 約 3Ω 質量 約 8g

インダクタンス 約 0.6mH

ΔT 直流 0.5A 流した場合、約 54°C

巻線仕様を計算するときは、絶縁層の厚みを含む仕上がり外径で考えます。

外径寸法を優先する場合は、内径を変えていけば計算できます。

4. インダクタンスを優先する場合

インダクタンスの計算は、長岡係数を使った計算式を使います。
解析ソフトの方が精度は高いと思いますが、簡単に机上計算できるのでそうしています。
算出するためのパラメータは、長岡係数、内径、長さ（厚さ）、巻数の4つです。
内径と長さは、希望する寸法で決めます。
内径と長さを決めれば、長岡係数も近似式で決まります。
後は、巻数をいろいろと変えて、目標に近い巻数を特定します。
下表は、計算値と実測値の比較です。
ほぼオーダーが合っていれば十分だと思います。
巻数が多く、内径に対し外径が大きくなると計算値は大きめのインダクタンスになります。
インダクタンスの調整は、カットアンドトライで修正すれば目標値のインダクタンスにできます。

半径 a (mm)	長さ b (mm)		長岡係数 A	μ_0 (kg·m·C ⁻²)	巻数 N (T)	計算値 Ls (mH)	実測値
45.00	6.00	15.000	0.144	1.256637E-06	30	0.172929	0.1678
70.00	6.00	23.333	0.089	1.256637E-06	30	0.259254	0.2937

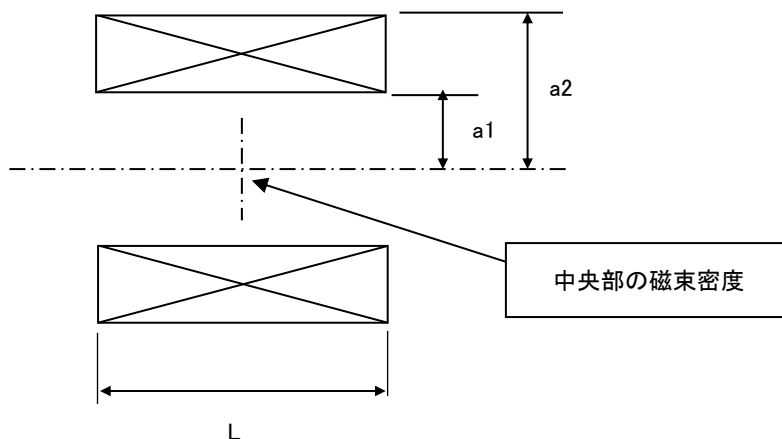
内径、長さ、巻数が決まれば、巻線仕様計算シートで詳細な仕様が決まります。

5. 磁束密度を優先する場合（ソレノイドコイル）

ソレノイドコイル（空芯）の磁束密度は、内径、外径、長さ、巻数、流す電流値で計算できます。
多分最初は、内径と長さを決め、巻数が増えれば外径が大きくなるので目標となる磁束密度と、電流の大きさを概算します。

巻線仕様計算シートで、調整を加えながら計算を繰り返せば、希望とする巻線仕様に行けるとおもいます。

下表は、空芯コイルの計算式ですが、
鉄材等のコアを入れると、空芯コイルの約3倍の磁束密度になります。

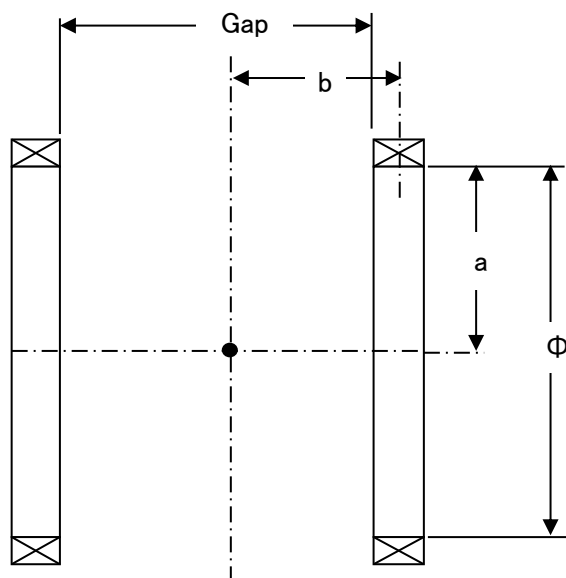


$\mu 0$ ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{C}^{-2}$)	内半径 a1(mm)	外半径 a2(mm)	長さ L(mm)	総巻数 N	電流 I(A)	コイル中央の磁束密度	
						B(T)	B(mT)
1.256637E-06	125	130	17.8	64	1.6	0.0005035	0.5034648
1.256637E-06						#DIV/0!	#DIV/0!

大雑把に巻線仕様を計算したら、コイルの表面温度 ΔT が何°Cになるか確認し、室温(使用環境温度) + ΔT が、電線の耐熱温度より低いことを確認します。
 例えば、電線の耐熱温度を超えたので電線を太くしたい、太くすると外径寸法が大きくなり、希望する外径に収まらない、といったケースも考えられます。

6. 磁束密度を優先する場合 (ヘルムホルツコイル)

ヘルムホルツコイルの計算式は、下図になります。
 コイルの内径、コイル間の距離、巻数、電流値が決まれば計算できます。
 例えば、地磁気をキャンセルしたいと言うときは、コイルの発熱により抵抗値が大きくなり、電流値が下がり磁束密度も弱くなります。
 このような場合、コイルの表面温度 ΔT が10°C未満になるように、巻線仕様を決める場合があります。
 個人的な感想ですが、この計算式による値と実測値は、比較的一致したと言う印象があります。



$$H = \frac{a^2 \cdot I \cdot N}{\{a^2 + b^2\}^{3/2}}$$

$$B = \mu 0 \cdot H$$

$$a = 2b$$

a : コイル半径

b : 中点とコイルとの距離

I : 電流[A]

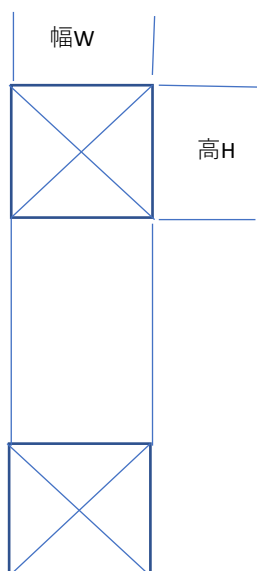
N : 巻数[回] ⇒ 1個の巻数

Φ : コイル内径

定数	入力データ				計算結果	
	$\mu 0$ ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{C}^{-2}$)	a (mm)	b (mm)	I (A)	N (回数)	B (T)
1.256637E-06	45	22.5	1	30	0.0006	0.599
1.256637E-06					#DIV/0!	#DIV/0!

7. コイルの外形寸法を優先する場合

コイルを装置に組み込むときに、限られた空間に納めないといけないケースがあります。



断面積 $H \times W$ の中に、何本の電線を収めることができるか、
という計算をします。

最も多くの本数を入れることができるのが密着巻きで、線占積率は約85~87%、
ガラ巻きでは約75%程度となります。

整列巻きが可能な線径は、導体径がせいぜい $\phi 0.09\text{mm}$ 程度でしょう。
それよりも細い線径では、密着巻きは難しくなります。

以前、JIS規格にない導体径 $\phi 0.02\text{mm}$ （JISでは $\phi 0.025$ が最小）の電線を支給
してもらい巻線したことがありますが、エアコンの風が当たったり、
室内に浮遊しているホコリが巻線中に付着するだけで、巻線が乱れます。

サドル型コイルでは、コイルの断面形状が三ヶ月状なので、線占積率を65%程度
で設計していました。

（とりあえずここまで、次ページ以降思案中）