

# 電動機の技術 第9回

## — 電動機の絶縁 —

森本 雅之\*

### 1 はじめに

この連載講座では、これまで、電動機の理論や制御について述べてきた。今回は電動機の絶縁について説明する。絶縁は、電動機の寿命に大きく関係し、また、電動機の故障原因の一つでもある。ここでは、実務上の参考となると考えられる事柄について述べてゆく。

### 2 絶縁の重要性

電動機技術の進歩は絶縁技術の向上による影響が大きい。20世紀初頭は、ゴム、布、木材、雲母などの天然素材により電動機の絶縁を行ってきた。その後、各種の材料が開発され、電動機が小型化し、耐熱性、耐電圧性が向上した。これは、新規材料が開発されたことだけでなく、高純度で均質な材料が得られるようになったことも関係している。

絶縁は電動機の寿命に大きく関わっている。絶縁寿命に最も影響が大きいのが温度である。絶縁に耐熱区分が設けられているのもこのことからきている。本稿では低圧電動機（600V以下）の絶縁を中心に述べてゆく。

### 3 電動機の絶縁構成

電動機の絶縁は、電流が流れる巻線に対して、それぞれ、巻線間絶縁、相间絶縁、対地間絶縁の三つに分けて考える。

巻線間絶縁は、同相のコイル間、および、直列のコイルのターン間の絶縁である。この絶縁は、通常はコイル導体表面の被覆により行う。エナメル線の場合、エナメル被覆が担う。

相间絶縁は、三相の各相の間の絶縁である。この絶縁にはフィルム材が用いられる。また、コイルと口出し線の接続部ではチューブが用いられる。

対地間絶縁は、巻線と鉄心の間の絶縁である。すなわち、スロット内の絶縁である。この絶縁には主にフィルム材が用いられる。

スロット内の絶縁は図1に示すような構成となっている。スロットの内壁は絶縁されている。これをスロット絶縁といい、フィルムをスロットの内壁に沿った形状に曲げたものが用いられる。低電圧の電動機（24Vなど）では粉体絶縁塗装によりスロット絶縁を行うこともある。

一つのスロットに回路や位相が異なるコイルが巻線される場合、コイル間の絶縁が必要である。これを層間絶縁という。層間絶縁はフィルムにより行う。コイルが収められた後、スロット開口部からコイルが飛び出さないようにくさび（ウエッジ）でふたをする。くさびにもフィルムが用いられる。くさびは絶縁のために用いられるのではなく、構造としての機能をもった部品である。スロット開口部の形状が磁束の分布に影響するため、

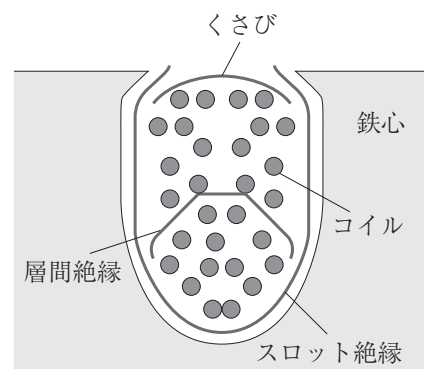


図1 スロット内の絶縁構成

\* Masayuki Morimoto モリモトラボ

くさびには磁性材料が用いられることもある。

電動機に使用される絶縁材料の例を表1に示す。電動機の内部では、フィルムだけでなく、繊維や塗料などの各種の絶縁材料が使われている。

絶縁材料は耐熱クラスで表2のように指定文字で区分される。表で示している温度指数とは、耐熱寿命が20,000時間になる温度を示している。絶縁材として使われる有機材料は、温度が高いと材料自身を劣化させる化学反応が促進される。そのため、絶縁材料は時間の経過とともに特性が劣化する摩耗部品と考えたほうが良い。

絶縁の規格では、かつては絶縁階級（Y種，A

種等）として区分し、最高許容温度を示していた。絶縁階級の区分では各種絶縁に使用しうる「絶縁材料表」が例示されていた。その階級に相当した材料を使用していればその絶縁階級の区分となった。しかし、現在の規格では耐熱クラスの指定は単なる使用材料の指定ではなく、製造者の組み合わせ責任であると規定されている。

絶縁材料は有機材料であり、熱により劣化する。熱劣化は熱分解、酸化、脱水、重合などの反応により起きるものであり、反応速度は温度が高いほど速くなる。反応速度を予測するための方法としてアレニウス法がある。アレニウス法を基にして

表1 電動機に使用される絶縁材料の例

絶縁部位	形状	材料の例
ターミナル，コネクタ	任意の形状	フェノール，ナイロン
リード線	電線の被覆	ポリエチレン，フッ素樹脂
マグネットワイヤ	エナメル焼き付け	各種（後述）
スロット絶縁	フィルム，塗装	PETなどの各種樹脂， アラミッド紙，ガラス繊維
相間絶縁	フィルム	
くさび（ウエッジ）	フィルム	
しばり糸	繊維	
わたり線絶縁	スリーブ	
リード線接続部	チューブ，フィルム	
ワニス	塗料	エポキシ，シリコーン
モールド	注型樹脂	各種注型用樹脂

表2 耐熱クラスと使用機器の例（JIS C 4003：2010をもとに作成）

指定文字	耐熱クラス（℃）	温度指数 <sup>1</sup>	使用機器の例	温度に相当する材料の商品名の例
Y	90	90 ≤ <105	30V以下の低圧機器 AV 機器など	
A	105	105 ≤ <120		
E	120	120 ≤ <130	家電	ルミラー，マイラー
B	130	130 ≤ <155	白物家電	
F	155	155 ≤ <180	産業機器	
H	180	180 ≤ <200	自動車，航空機 大容量発電機，	カプトン
N	200	200 ≤ <220	電鉄	
R	220	220 ≤ <250		ノーメックス，
250	250	250 ≤ <275	原子力機器	テフロン，

備考 かつては180℃以上をC種と総称していた。

<sup>1</sup> 耐熱寿命20000時間になる温度をさす。

導かれた寿命推定は次のように表される。

$$L_x = L_0 2^{\frac{T_0 - T_x}{10}} \quad (1)$$

ここで、 $L_x$ ：推定寿命、 $L_0$ ：規定温度 ( $T_0$ ) の寿命、 $T_x$ ：使用時の温度である。

この式は、10℃半減則といわれている。10℃半減則とは、温度が10℃上昇するごとに推定寿命が半減し、逆に、温度が10℃低下すれば推定寿命が倍増することを表している。なお、規格では、初期の特性の半分になる時間を耐熱寿命と定義している。表2に示した温度指数は20,000時間後に耐熱寿命になる温度を示している。

## 4 絶縁材料

### 4.1 マグネットワイヤ

電動機のコイルに用いられる電線を一般にマグネットワイヤとよぶ。JIS C 3053では「電気機器の巻線及び配線に用いるエナメル線と横巻線の総称」と規定されている。エナメル線とは、導体に樹脂、絶縁塗料を焼き付けたものである。また、横巻線とは導体の長さ方向に対して繊維、テープなどをらせん状に巻きつけたものである。低圧、中小容量ではエナメル線を使用し、高圧、大容量では横巻線を使用する。

エナメル線の基本構造を図2に示す。エナメル線の絶縁皮膜の厚さは10 $\mu\text{m}$ 程度である。絶縁破壊電圧は皮膜の種類によるが、ほぼ200~300V/ $\mu\text{m}$ である。10 $\mu\text{m}$ の膜厚であれば数kVの絶縁破壊

電圧となる。ただし、巻線作業などにより皮膜のキズ、伸びなどが生じるため、電動機として完成後の耐電圧として考える必要がある。表3にエナメル線の主な種類を示す。皮膜の種類により、耐薬品性、機械特性、加水分解性能などが異なる。

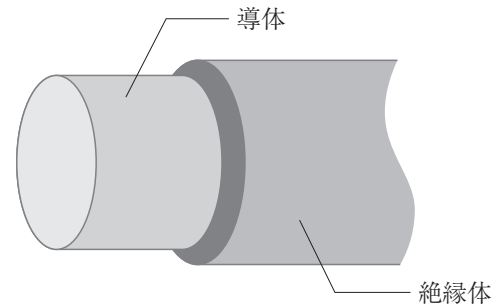


図2 エナメル線の基本構造

エナメル線の皮膜厚さは0種から3種までの種類で示される。0種がもっとも厚く、3種が最も薄いものを示す。規格ではこのような規定しかされていない。これは導体の径によって厚め、薄めの寸法が異なるため数値的に規定していないのである。エナメル線の仕様では被膜は最小被膜厚さで表示される。また、ダブルコート線と称して多層の皮膜を持つものもある。

横巻線は、丸線または平角線の周囲に絶縁物を巻きつけたものである。横巻線に使われる絶縁物としてガラス繊維、カプトンテープ（耐熱ポリイ

表3 マグネットワイヤ（エナメル線）の種類と用途

記号	種類	指定文字	耐熱クラス	用途
PVF	ホルマール線	A	105	油冷変圧器
UEW	ポリウレタン線	B	130	電子機器用コイル 小型モータ（100W以下）
PEW	ポリエステル線	E	155	汎用モータ 自動車用小型モータ 家電
EIW	エステルイミド線	H	180	自動車用オルタネータ 自動車駆動モータ エアコン、冷蔵庫 電動工具
EAW	エステルイミド- アミドイミド線	N	200	
AIW	アミドイミド線	R	220	
PIW, IMW など	ポリイミド線	250	250	特殊耐熱機器 原子力、航空機、IHコイル

ミドフィルム), ノーメックステープ (耐熱ポリアミド紙), マイカテープ (ポリエステルテープに集成マイカを貼ったもの) などがある。大容量の電動機では, 導体として金属材料をそのまま用いて, 組み立て時に絶縁物を装着し, 最後に全体を樹脂で含浸してマグネットワイヤを構成する。

#### 4.2 フィルム材

スロット絶縁や層間絶縁に使われるフィルム材はプラスチックフィルムのほか, 絶縁紙, 張り合わせフィルム, ワニスクロスなどが使われる。代表的なフィルム材を表4に示す。このほか, 各材料の欠点を補完するため, 異種材のフィルムを張り合わせたりするものもよく使われる。例えば, アラミド紙は耐熱性が優れているが機械的に弱く, 吸湿しやすいので, 両面にPEN (ポリエチレンナフタレート) を張り付ける, などのような構成がある。フィルム材は耐熱性だけでなく, 耐薬品性, 機械的特性など様々な観点で選定される。

#### 4.3 ワニス

巻線はワニスを含浸し固める。これをワニス処理という。現在は合成樹脂を使用しているが, 歴史的に松脂などの天然樹脂を利用したワニスを用いたことからこの名称が残っている。ワニス処理の目的を次に示す。

- ①巻線部分を機器本体に固着させ, 機械的強度を上げる。
- ②巻線部分への湿気, 塵埃, ガスなどの浸入を防ぐ。
- ③繊維質材料 (絶縁紙やテープなど) に含浸し強

度, 耐水性を与える。

④コイルの耐熱性および寿命を向上させる。

⑤金属部分の腐食を防ぐ。

ワニスにはフェノール系, エポキシ系, ポリエステル系, シリコン系等の各種の合成樹脂が用いられる。それぞれの樹脂の耐熱性能を考える必要があるが, 何より大切なのはマグネットワイヤのエナメルとの相性である。相性とはマグネットワイヤのエナメルと触れたときにエナメル被膜にひびや膨れを生じさせないことを指している。この現象をクレージングと呼ぶ。クレージングが起こりにくいことが相性が良いワニスである。

ワニスは溶剤型ワニスと無溶剤型ワニスに大別される。溶剤型は主として有機溶剤を用いて, ワニス処理後に有機溶剤を蒸発させて (乾燥) 固化する。そのため, どうしても溶剤の抜けた後の空隙が残ってしまう。無溶剤型ワニスは熱により固化するものや硬化剤を混入するものがある。空隙の防止および有機溶剤作業を減らす観点から無溶剤ワニスの採用が多くなっている。

### 5 絶縁試験

材料ごとに, 絶縁の規格があり, それぞれ試験法が定められている。また, 電動機の製造工程において行う絶縁試験も各種ある。ここでは, 電動機として, 現場で行う絶縁試験について述べる。電動機として行うので, 測定は端子間または端子とケース間で行う。もちろん, 電動機は電源から

表4 フィルム材の例

材料	指定文字	耐熱クラス (°C)	備考
木材, 布などのワニス含浸	A	105	
PET	E	120	ポリエチレンテレフタレート (PET), ポリエステルの一種 商品名 ルミラー, マイラー
	B	130	
PEN	F	155	ポリエチレンナフタレート (PEN), ポリエステルの一種
ポリアミド	H	180	商品名 カプトン
ポリアミド紙	R	220	アラミド紙 商品名 ノーメックス
テフロン	250	250	

切り離して測定する必要がある。

### 5.1 絶縁抵抗

絶縁抵抗計（メガと通称される）でコイルとケース間、または相間の抵抗を測定する。一般的にはDC500Vを印加したときの絶縁抵抗値（単位はMΩとなる）および漏れ電流で評価する。測定値の表示が安定したときの数値が絶縁抵抗である。

絶縁抵抗の数値から絶縁物の吸湿や汚損の状態が推定できる。しかし、絶縁抵抗値は温度、湿度などで変動するので、単純に数値で評価するのは難しい。長期的な変化を見れば劣化が推定できる。

### 5.2 直流試験

電動機の端子に直流の高電圧を印加すると流れる電流は、図3に示すように時間的に変化する。測定電流の構成要素は次のように考えられる。初期に流れる成分は変位電流と呼ばれ、絶縁物を理想的な静電容量と考えたとき、その形状から決まる静電容量の瞬時の充電電流である。時間とともに減少する成分は吸収電流と呼ばれる。吸収電流とは、誘電分極により誘電損失が生じるので、CRの時定数をもって変化する電流である。直流分は漏れ電流と呼ばれ、絶縁抵抗により決まる電流である。このため、一般には電圧印加1分後と10分後の電流を測定し、次に示す成極指数（PI）として評価する。一般に、 $PI > 1$ であれば正常であるといわれている。

$$PI = \frac{1分後の電流}{10分後の電流} = \frac{10分後の絶縁抵抗}{1分後の絶縁抵抗} \quad (2)$$

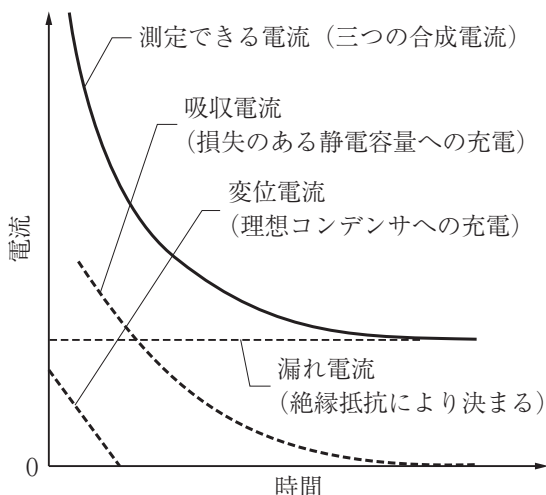


図3 直流電流の時間的变化

### 5.3 $\tan\delta$

交流電圧を印加することにより絶縁物の誘電体損失角  $\tan\delta$  を求める。 $\tan\delta$  は誘電体の損失に比例するので、 $\tan\delta$  の変化から、絶縁物の状態の変化を見ることができる。ただし、吸湿などにより  $\tan\delta$  が変動するので、長期的な変化を見る必要がある。

### 5.4 部分放電試験

部分放電試験は電動機絶縁全体の平均的な測定ではなく、絶縁物内部のボイド（空隙）による局所的な変化が測定できる試験である。部分放電は絶縁物内部の空隙がエアギャップとなり、空隙内部で火花放電する現象である。部分放電の評価は、部分放電開始電圧や放電パルスの発生頻度などでも可能であるが、一般的には放電電荷量（単位ピコクーロン）により評価される。内部のボイドは経時的にクラックなどにより増加すること考えたほうがよい。

### 5.5 絶縁耐力

各相のコイルを一括して交流高電圧を印加し、漏れ電流の値で評価する。一般的には、所定の電圧を1分間印加して異常がないことを評価基準とする。100V機で1200V、200V機で1500Vがよく使われるが、これは定格電圧をEとしたとき、 $2E + 1000V$  を一つの基準にしているためである。ただし、この試験はこれまで述べた非破壊試験ではないので、運用中の電動機の測定には使われない。

### 5.6 絶縁劣化の判定

これまで述べた各種の試験結果の数値については、高圧電動機では判定基準となる数値があり、絶縁劣化の進展が推定できる。しかし、低圧電動機では、各数値と劣化状態が定量化されていない。したがって、長期的な変化から劣化の進展や程度を推定するしかない。

## 6 絶縁劣化

低圧電動機の絶縁寿命として、絶縁寿命消化率Lにより説明されることがある。

$$L = \frac{(\text{運転時間}) \times 2^{\frac{T_1 - T_2}{10}}}{\text{絶縁の許容耐熱寿命}} + \frac{\text{実始動回数}}{\text{許容始動回数}} + \frac{(\text{実始動回数})^\alpha}{\text{許容課電時間}} \quad (3)$$

ここで、 $T_1$ ：絶縁許容温度、 $T_2$ ：運転時の巻

線温度,  $\alpha$ : 環境係数である。

絶縁寿命消化率の理論では,  $L = 1$  となる時点  
を絶縁寿命としている。右辺第1項は熱による劣  
化, 第2項は電磁振動による機械的劣化, 第3項  
は課電劣化を表している。

しかし, 実際にはこれらが互いに関係しながら  
劣化が進むと考えられる。そこで, 絶縁劣化の要  
因を電氣的要因, 熱的要因, 環境的要因, および  
機械的要因に分類する。電氣的要因とは過電圧な  
どによる強電界, 部分放電などによるものである。  
熱的要因とは温度上昇によるものである。環境的  
要因とは水分, 酸化, 塵埃などによるものである。  
機械的要因とは熱膨張や応力である。

絶縁劣化はこれらの各要因の複合で進み, 複雑  
なプロセスで進展してゆく。これらの要因が複合  
して絶縁破壊に至るメカニズムの一例を図4に示  
す。最初のステップでは電氣的な要因が加わり,  
損失が増加し温度上昇する。それにより化学変化  
が起こり, さらに温度上昇する。またこのステッ  
プで温度および環境的要因が加わることにより化  
学変化が起こることもある。さらに機械的要因が  
加わるとクラックが入るなどの機械的な欠陥が生  
じる。これにより部分放電を生じる。そして最終  
的に絶縁破壊に至る。

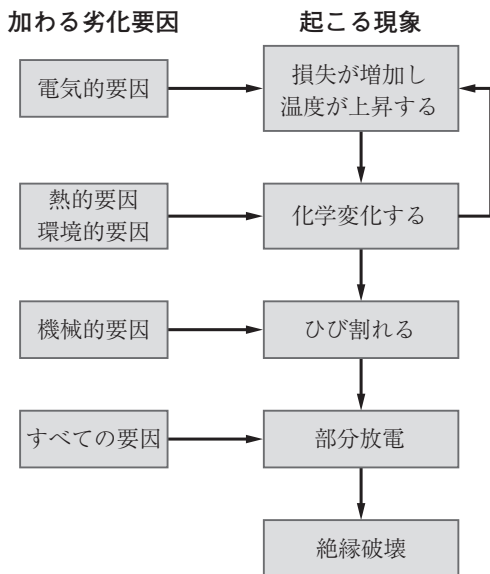


図4 絶縁劣化の進展

## 7 インバータサージ

近年は多くのモーターがインバータで駆動され  
ている。インバータ駆動の場合, インバータの発  
生するサージによる絶縁劣化を考慮する必要がある。  
インバータの出力電圧波形を図5に示す。図  
は400V 電源で用いるインバータの出力波形を示  
している。電源電圧が交流400V のとき, イン  
バータの直流リンクの電圧  $E$  の最大値は  $E = \sqrt{2}$   
 $\times 400 = 565\text{V}$  である。インバータのスイッチ  
ングによるサージのピーク電圧は直流リンク電圧の  
2倍となる。したがって約1.1kV のサージが発  
生する。

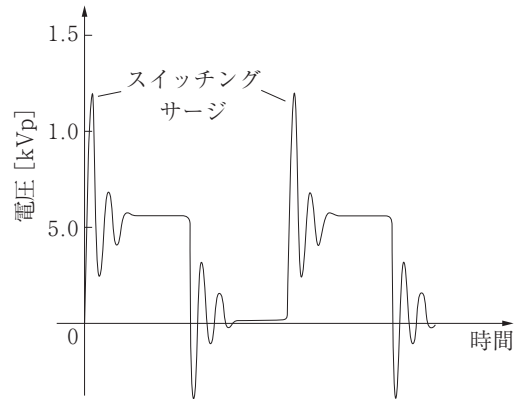


図5 インバータの発生するサージ電圧

インバータのスイッチングサージにより, 電動  
機の巻線間で部分放電が起きる可能性がある。巻  
線の絶縁被膜は誘電体なので誘電体の沿面放電が  
漏えい的に起こる。この放電に火花が生じればコ  
ロナ放電となる。コロナ放電では電界で加速され  
た電子が放出されるので電子が絶縁被膜を浸蝕す  
る。しかしこの現象は, サージが発生している,  
ごく短い時間だけ起こる現象である。単発のサー  
ジによる浸食ではすぐには絶縁低下とはならない。  
スイッチングにより繰り返されるため, 被膜を  
徐々に傷めてゆく。やがて絶縁破壊する。なお,  
スイッチングサージは, インバータと電動機の配  
線長さが長いほどサージ電圧が高くなる傾向がある。

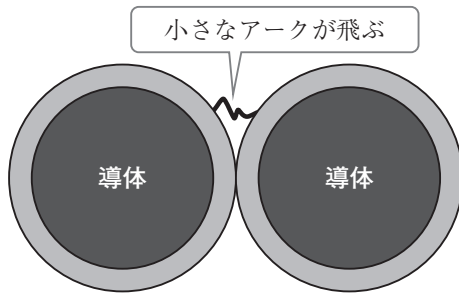


図6 部分放電による皮膜の劣化

部分放電に対する評価として部分放電開始電圧 (PDIV) が用いられる。一般のマグネットワイヤの部分放電開始電圧は約900Vといわれている。そのため、400V級インバータで使用する電動機にはインバータ用エナメル線が使用されている。インバータ用エナメル線はエナメルに部分放電に耐性のある無機の微粒子を添加している。インバータ用電動機はモータ特性だけでなく、インバータ用エナメル線を使って部分放電に対して絶縁強化された電動機である。200V級では商用電源で用いる電動機でもインバータサージはPDIV以下なので、通常の電動機がそのままインバータ駆動できる。400V級の電動機の場合、必ずインバータ用電動機を用いる必要がある。

## 8 おわりに

今回は電動機を使用するうえで知っておきたい絶縁について解説した。電動機事故の多くは、軸受けまたは絶縁不良に起因する。絶縁不良の多くは異音等を生じないため、日々の保守、点検で防いでゆく必要がある。なお、さらに詳しく知りたい場合、拙著「入門モーター工学」(森北出版)も参考になると思われる。

本講座の掲載予定を以下に示す。

- 1 電動機を理解するための電磁気と電気回路 (2022年4月号)
- 2 電動機の基礎技術 (2022年6月号)
- 3 直流電動機 (2022年8月号)
- 4 直流電動機の制御と永久磁石直流電動機 (2022年10月号)
- 5 誘導電動機 (2022年12月号)
- 6 かご型誘導電動機の駆動と制御 (2023年2月号)
- 7 巻線型誘導電動機 (2023年4月号)
- 8 同期電動機 (2023年6月号)
- 9 電動機の絶縁 (本号)
- 10 電動機技術の動向