

第三章 電氣材料

第一節 導電材料

§ 32 導電材料の種類及用途

導電材料とは電流を流す爲の通路即ち導體として利用されるものであつて、これを用途に従つて大別すれば次の四種類となる。

イ 電線材料

電線又は電氣機械用捲線等の如く、電流を發生し或はこれを需要個所まで傳達するに用ふる導體は出来る限り抵抗の低いことが第一條件であつて、價格の低廉なること及び機械的性質の適當であることも亦重要な事項である。茲にいふ機械的性質とは抗張力、伸、彈性限度及び線膨脹係數等を指す。是等の三條件を満足するものとして電線材料に使用されつゝあるものは銅及びアルミニウムであつて、特殊の目的には鋼鐵も使用される。

ロ 抵抗材料

電力を熱として利用する爲め又は或る回路の電流を制限する爲めには抵抗の高い導電材料が必要である。斯様な目的に使用する材料を抵抗材料といひ、各種の合金、鐵、水及び炭素等が用ひられる。

ハ 可熔片材料

可熔片 (Fuse) とは規定以上の電流が流れた時電流の熱作用に依つて自ら熔融斷線し、その回路の電流を斷絶させるに使用するものであつて、簡易なる保護裝置である。可熔片は熔融し易いことが主要な條件であるから錫、蒼鉛、鉛等から成る合金^{**}を使用し、時にはカドミウムをも更に加えることがある。

* 發電機、途中の導線等の全抵抗を R オームとすれば I アムペアの電流がその中を流れる時、 $I^2 R$ ワットの損失がある。

** 錫1、蒼鉛2、鉛1の合金の熔融温度は $98^{\circ}C$ である。

二 電極材料

電気爐、弧光燈等の電極は $3,000^{\circ}\text{C}$ 以上の高温度となり、大抵の物質は熔融するから普通炭素以外のものは使用しない。只だ近來弧光燈にタングステンを極とするものが現れた。

水銀整流器ではこれと反對に高熱により蒸發し易い水銀が其の電極材料、特に陰極材料として欠くことの出来ないものとなつた。

以上四種の材料の内、ハ及ニは特殊のものであるから省略し、電線材料及抵抗材料のみに就て再説する。

§ 33 電線材料

電線材料として廣く使用されるのは銅であるから、本書に於ては之について各種の重要なる性質を述べ、其の他の金屬に就ては數表を掲げるに止める。

イ 材料の純度

金屬の電気抵抗は一般に純度の高いほど小となる。故に電線材料の如く、抵抗の成るべく低い方がよい場合に於ては純度を成るべく高くすることが望ましい。工業的精煉法としては電解法のみが用ゐられ、電線に使用される銅は全部この操作を経たものであつて、これを電気銅(Electrolytic Copper)と云ふ。この化學的純度は 99.9% 程度であるが、品位を表すには化學的純度を用ひないで導電率を用ひる。

ロ 硬引と焼鈍

電気銅のインゴットから線にするには最初 800°C 位に熱してロールにかけ荒

* 銅の電解法とは硫酸銅溶液中に粗銅を陽極とし、純銅薄板を陰極として電流を通じ、粗銅中の銅は一旦溶液中にイオンとして溶解させた後陰極に析出せしむる方法であつて、銅の純度を高ゆるのみならず粗銅に含まれた金、銀其他の金屬を分離利用し得る利がある。

引線をつくるが、其後は常温のままにて幾回かダイス(Dies)と稱する型を潜らせて引伸し次第に細くする。斯様に冷い状態にて引き伸すことを冷牽伸(Cold Drawing)といひ、かくして出來た線を硬引銅線(Hard-Drawn Copper Wire)といふ。架空電線等の如く機械的強度を要する銅線は全部これである。硬引銅を 200°C 以上に熱すると冷牽伸に依つて細くなつてゐた銅の結晶粒子が併合成長し質が軟くなる。斯様な操作を焼鈍(Annealing)といひ、斯様な操作を経た銅線を焼鈍銅線(Annealed Copper Wire)又は軟銅線(Soft-Drawn Copper Wire)といふ。

ハ 固有抵抗及導電率

標準温度に於ける斷面積 1 平方糎、長さ 1 糎の抵抗を其の材料の固有抵抗(Specific Resistance)といひ、工業用軟銅の世界的標準である國際標準軟銅の 20°C に於ける固有抵抗は 1.7241 マイクロオーム糎である。

導電率(Conductivity)とは固有抵抗の逆數を云ひ、上記標準銅の導電率を 100% とし、同一容積を有する他の材料の導電率を百分率で表したものをパーセント導電率(Per Cent Conductivity)又は略して單に導電率といふ。硬銅の導電率は軟銅より平均約 3% 低く、硬引アルミニウムは焼鈍アルミニウムより約 2% 低い。

ニ 抵抗の温度係數

金屬の電気抵抗は一般に温度と共に増加する。 R_t 及び R_{20} を夫々 $t^{\circ}\text{C}$ 及び 20°C に於ける抵抗、 α_{20} を 20°C に於ける抵抗の温度係數(Temperature Coefficient of Resistance)とすれば温度と抵抗との關係は次の如くなる。

$$R_t = R_{20} \{1 + \alpha_{20}(t - 20)\}$$

導電率 100% の軟銅にありては $\alpha_{20} = 0.00393$ である。^{**}

* 1 マイクロオーム = 1/1,000,000 オーム

** α は銅の温度及び導電率に依り異なる。銅の抵抗換算には次式を用ゐると便利である。

$$R'_t = R_t \left(1 + \frac{t' - t}{234.5 + t}\right)$$

但し t' は各任意の攝氏温度、 R_t 、 R'_t はそれ等に相當する抵抗である。

ホ 抗張力及伸

銅線の抗張力(Tensile Strength)即ち試料を切斷するに要する單位斷面積當り最小張力は線の大きさに依つて異り、細くなるほど大となる。これは細い線ほど冷率伸を受ける回數が多いからである。伸(Elongation)とは切斷直前までの線の伸を試料の長さの百分率にて表したものである。同一材料では伸は抗張力が大となるほど小となる。(巻末銅線表参照) 抗張力及伸に對するこの傾向はアルミニウムに對しても同様である。

ヘ 弾性限度及弾性係數

銅の弾性限度(Elastic Limit) 及弾性係數(Young's Modulus of Elasticity) は軟銅に對しては明瞭でないが、硬銅では大略第2表に示す如くである。

第 2 表

電線用金属 (本表の数値は内地製品の概數なり)

	軟 銅	硬 銅	硬引アルミニウム	鐵(亞鉛鍍)
比 重 (20°C)	8.89	8.89	2.70	7.8
熔 融 温 度、°C	1,083	1,083	658	—
導 電 率、%	99—97(細)	97—96(細)	61	13
固有抵抗、マイクロオーム糧 (20°C)	1.76—1.79(細)	1.79—1.82(細)	2.83	13.4
抵抗温度係數、/°C (20°C)	0.00389— 0.00391(細)	0.00381— 0.00377(細)	0.0039	0.005
線膨脹係數、/°C	0.0000171	0.0000171	0.0000231	0.000012
抗張力、 庇 / 平方耗	24—28(細)	35—46(細)	13—17(細)	35
伸、%	35—20(細)	3—0.3(細)	4—2 (細)	12—7(細)
弾性限度、庇 / 平方耗	—	21—28(細)	8—12	18
弾性係數、庇 / 平方耗	—	8,000—14,000	13,300	17,000

(注意) 表中(細)とあるは細き線に適用すべき數字を指す。

§ 34 電 線

イ 電線の種類

電線の太さは直径を耗にて表した數字を用ひ、幾耗線といふ。通常 12 耗以下數十種の太さのものが作られる。斷面積の大なるものは取扱の便宜上、7 本、19 本、37 本、61 本……等の線を撚り合せた撚線(Strand wire)が用ゐられる。(巻末撚線表参照)

電線には裸にて使用するものと、絶縁被覆を有するものとある。後者に使用するものの中、ゴム絶縁の場合には絶縁ゴム中の硫黄に侵されることを防ぐ爲に銅線には錫鍍金を施す。絶縁電線には次の四種類がある。

第一種絶縁線 撚綿糸にて一回編組を施し、其の厚さ 0.75 耗以上のもの。

第二種絶縁線 撚綿糸にて二回編組を施し、其の厚さ 1.5 耗以上のもの。

第三種絶縁線 純ゴム 20% 以上を有するゴム混合物にて規定の厚さに被覆し、撚綿糸にて編組したる後硫化し、編組被覆物には黑色耐水質混和物を浸透せしめたもの。

第四種絶縁線 純ゴム 30% 以上を有する白黒二層のゴム混合物を以つて規定の厚さに被覆し、厚さ 0.25 耗以上のゴム引綿テープを以つて重覆纏捲したる後硫化し、撚綿糸にて編組し、これに赤色耐水質混和物を浸透したるもの。

第四種線には 600 ヴォルト以下用、2,200 ヴォルト以下用、3,300 ヴォルト以下用、6,600 ヴォルト以下用及び 11,000 ヴォルト以下用の區別がある。

絶縁電線にはこの外に、綿捲線、絹捲線、エナメル線等があり、電気機器製作の際材料として使用される。

ロ 特殊電線

電車線 (Trolley Wire)

材質から見れば硬銅が多いが、機械的磨耗の多いところに使用する目的で、銅にカドミウムを少量混じれたカドミウム銅、硅素を溶かした硅銅等も用ひられる。形状からは圓形及び溝附の二種に區別され、前者は一般電線と同様に直径耗にて、

後者は公稱断面積（平方寸）にて其の大きを表はす。（卷末電線表参照）

鋼心アルミニウム撚線 (Steel Core Aluminium Cable)

第2表より判る如く、アルミニウムは抗張力の小なることが缺點である。これを補ふ爲にアルミニウム撚線の中心に抗張力の特に強い鋼鐵線を入れて、機械的負荷は鋼心に負はせ電流は主としてアルミニウムに依つて傳へるやうなものを用ふる。これを鋼心アルミニウム撚線といふ。（卷末鋼心アルミニウム撚線表参照）

銅覆鋼線 (Copper-Weld Steel Wire)

前述のものと趣旨のものであるが、表面の銅と中心の鋼とが特殊の方法で熔着されてゐるから鋼心の腐蝕する心配がない。これは主として電信電話用に使用され、合成導電率 80% 及 40% が普通である。

§ 35 抵抗材料

イ 合金

固有抵抗を高くするには単一金屬よりも合金とする方がよい。合金も成分の種類と配合割合とに依つて色々のものが出来るが、著名なものは第3表に示す如くである。

第 3 表
抵抗用合金

名 稱	洋 銀	マンガン	ニクロム	鑄 鐵
成 分	{ 銅 85% ニッケル 18% 亜鉛.....	{ 銅 85% ニッケル 3% マンガン 12%	{ ニッケル クロム	{ 鐵 炭 其他不純物
固有抵抗、マイクローム	33.2	42.4	99.5	75—98
抵抗温度係數、 $1/^\circ C$	0.000172	0.00011	0.00024	0.0062
最高使用温度、 $^\circ C$	260.	—	1,200	350
熔解温度、 $^\circ C$	1,030.	—	1,540	1,100
用 途	抵抗線	標準抵抗器 其他計器用	電熱器	格子形抵抗

□ 水

抵抗の値を一定不變に保持する必要のない場合には金屬板を電極として、水を抵抗材料に使用することがある。水の抵抗は其の含有する不純物の多少によつて異り、普通の河川の水は 800 ~ 12,000 オーム糎の固有抵抗を有し、導電率を高める場合には食鹽、硫酸、苛性曹達等を適度に溶解して使用する。

ハ 炭 素

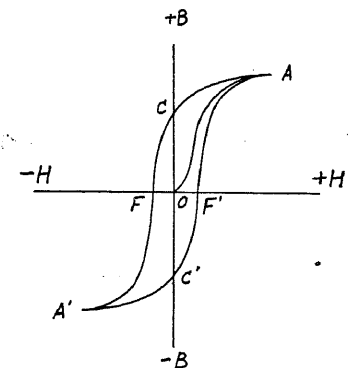
炭素は接觸部分の壓力を變へると抵抗が變る性質があるから、之を利用して加減抵抗器として使用される。電話送話器は音波の振動に依つて送話器内の炭素に加はる壓力を變化し、音聲に相當する電流の變化を生ぜしめるものである。（§146 参照）

第二節 磁 氣 材 料

§ 36 強磁性體の一般性質

鐵又は鋼の如き強磁性體を § 15 に述べたやうに電流にて磁化すれば、磁化力 H の増加に伴ふ磁束密度（又は磁氣誘導） B の變化は第40圖 OA の飽和曲線にて示され、 A に於て飽和の状態となる。

次に H を次第に減少すれば、 B の變化は H を増加する場合と異り、曲線 AC に従つて減少し、 H を零とした場合に残留磁氣 OC を残す。 H を更に代數的に減少すると B は稍急激に減少し、 $H = OF$ となつた時に $B = 0$ となり、終に A' に於て A と反対方向の磁氣飽和を起す。次に H を代數



第 40 圖

* H は線輪電流に比例するから H を増すには線輪電流を増せばよい。鐵を磁化する爲の電流を勵磁電流といふ。

的に増して行けば $ACFA'$ とは異つた道程 $A'C'F'$ を通過して A 點に戻る。斯様な現象をヒステリシス(Hysteresis)といひ、かくして得たる包圍曲線をヒステリシス ループ(Hysteresis Loop)と云ふ。電磁石を交流に依つて磁化すれば一周毎に斯様なループを畫き、ループの面積に比例する損失が鐵心中に起る。これをヒステリシス損失(Hysteresis Loss)といふ。今

$W =$ 鐵心一立方糎内に起る損失、ワット

$f =$ 周波數

$B_{max} =$ 最大磁束密度、ガウス

$\eta =$ ヒステリシス係數

とすれば

$$W = \eta f B_{max}^{1.6} \times 10^{-7}$$

なる關係がある。 η は材料に特有な常數で其の大なる材料は交番磁化に對して損失が大であつて、これはヒステリシスループの面積が大なる事を意味する。

鐵を交流にて磁化する場合には鐵内部の磁束が絶えず増減を繰り返すから電磁誘導 (§ 16) に依つて鐵材中に電壓を誘起し、渦狀の電流が材料内部に流れる。これを渦流(Eddy Current)といひ、これに依つて渦流損失(Eddy Current Loss)が生ずる。電気機械に於て常に薄鐵板より成る成層鐵心(Laminated Core)を使用するのはこの渦流損失を輕減する爲である。

今

$W_e =$ 材料一立方糎内に生ずる渦流損失、ワット / 立方糎

$t =$ 鐵板の厚さ、糎

$f =$ 周波數

$B_{max} =$ 最大磁束密度、ガウス

$\rho =$ 鐵板の固有抵抗、マイクロオーム糎

とすれば

$$W_e = \frac{(\pi t f B_{max})^2}{6 \rho 10^{18}}$$

なる關係がある。これに依り渦流損失を減ずるには鐵板の厚さを小とするか、又は固有抵抗を大とすればよいことが判る。

ヒステリシス損失と渦流損失とは常に相伴ふものであつて、兩者を總稱して鐵損又は心損(Iron Loss or Core Loss)といふ。

§ 37 磁氣材料の種類と性質

イ 鑄 鐵

導磁率低く、ヒステリシス係數が大であるから、一定の磁束密度にて使用する場合にも、交番磁化に使用する場合にも適當な材料とは云へない。但し鑄造が容易なものと、價格が廉いために電機繼鐵 (§ 53) などに用ゐられる事がある。

ロ 鑄 鋼

イに比して導磁率は餘程高く、ヒステリシス係數も小であるが、鑄物であるため渦流損失を少なくすることが出来ないから主として鑄鐵と同様な方面に使用される。

ハ 平爐鋼薄板

平爐鋼を薄板にしたものであつて、珪素含有量は 1% 以下である。適當に燒鈍したものは最大導磁率 4,000 ~ 8,000、 $\eta = 0.003$ 、性質強靱であるから廻轉機械の成層鐵心として廣く使用され、變壓器鐵心にも使用されることがある。

ニ 珪素鋼

珪素鋼には低珪素鋼(珪素 2% 位)と高珪素鋼(4%)とがある。前者は最大導磁率 5,000、 $\eta = 0.0009$ にて、平爐鋼と同様に使用される。後者は珪素の含有量が多い爲め性質脆弱であるが導磁率 5,000 ~ 10,000、 $\eta = 0.0007$ であり、且つ固有抵抗が 55 マイクロオーム糎で他の電気用鐵板より著しく高く渦流損失も少いから、變壓器鐵心には好適の性質を具備し、この方面に多量に使用されてゐる。

ホ 磁石鋼

残留磁氣(第40圖 OC)及び保磁力(第40圖 OF')の兩者の大なるものは強く且つ安定なる永久磁石を作るに適する。タングステン鋼、クロム鋼等にはかくの如き性質があるから、永久磁石用として用ひられてゐる。

第三節 絶縁材料

§ 38 絶縁材料の一般特性

絶縁材料に必要な條件は使用の目的に依つて異なるが、概括的に述べれば次の如くである。

電氣的特性 絶縁抵抗、絶縁耐力は共に大にて、誘電體損失^{*}、溫度係数は小で誘電率^{**}の適當なること。

機械的特性 抗張力大にして、性質脆弱ならず、多孔性及吸濕性なく、加工の容易なること。

熱的特性 熱抵抗、膨脹係數低く、引火點及發火點の高きこと。尙固體にありては軟化點及熔融點高く、液體にありては沸騰點高く、凝固點及粘度低きこと。

化學的特性 化學的に安定にして、酸、アルカリ及油に不溶解性なること。

次に電氣的特性の主要な事項に関して簡單なる説明を加えよう。

イ 絶縁抵抗

絶縁抵抗 (Insulation Resistance) とは絶縁物に電壓を加えた時に流れる漏洩電流より算出せる抵抗であつて、絶縁の良否を示す尺度である。絶縁抵抗は材料及

* 絶縁物の事を誘電體とも云ふ。

** 蓄電器の電極間に或る絶縁物が介在する時と、空氣又は眞空が介在する時との静電容量の比を其の絶縁物の誘電率 (Specific Inductive Capacity 又は Dielectric Constant) と云ひ、通常 ϵ にて表はす。(§ 9 参照)

其の溫度^{*}に依つて異なるのみならず、絶縁物内部又は表面に在る濕氣^{**}、塵埃の附着等に依つても著しく異なる。製作に當つては良好な絶縁材料を使用しても保守に於て注意しなければ思はぬ故障を起すおそれがあるから絶縁抵抗には絶えず注意する必要がある。

ロ 絶縁耐力

絶縁體に或る程度以上の電壓を加へると破壊し、絶縁の用を爲さなくなる。其の耐へ得る電壓を絶縁耐力 (Dielectric Strength) と云ひ、ヴォルト/耗にて表はす。絶縁耐力は同一物質に對しても試験用電極の形狀及大きさ、試片の厚さ、加壓時間、交直流の別及周波數、溫度及濕度等に依つて多少異なる^{***}。

ハ 誘電體損失

誘電體損失 (Dielectric Loss) とは絶縁物に交番電壓を加えた場合に絶縁物内部に生ずる損失で、これは熱となつて絶縁物の溫度を上げることになる。磁氣材料に於けるヒステリシス損失の如きものであるから誘電體ヒステリシス (Dielectric Hysteresis) ともいふ。絶縁耐力が周波數の高くなるほど低くなるのもこの影響があるからである。

§ 39 主要絶縁材料の特性概要

多數の絶縁材料の特性全般に亘つて述べることは紙數が許さないから、ここには代表的なものの主なる特性を表にて示すこととする。

* 絶縁抵抗は溫度が上るに従つて低くなる。 R_0 及 R_t を 0°C 及 $t^\circ\text{C}$ に於ける絶縁抵抗とすれば $R_t = R_0 e^{-\alpha t}$ なる關係がある。 α は絶縁抵抗の溫度係數である。

** 久しく使用を停止してゐた電氣機器を再び使用するに當つては熱風乾燥器、炭火、電熱等に依つて緩かに温め、濕氣を取去つて絶縁の回復した後に運轉する必要がある。この操作を電機乾燥 (Baking) といひ、電壓の高い機械に於ては特に必要である。

*** 絶縁耐力は試片の厚さが厚い程、加壓時間が長い程、周波數及溫度が高い程濕度が大なる程低くなる。而して絶縁耐力に關し交流電壓と等價なる直流電壓は交流電壓の 1.41 倍即ち最大値に等しかるべき筈であるが、實際はこれよりも 50—100% 高い直流電壓に耐へ得る。但し空氣及油に對しては直流絶縁耐力は交流絶縁耐力の最大値に等しい。

第 4 表

絶 縁 物	絶 縁 抵 抗 10 ¹² オーム/立方糎	絶 縁 耐 力 ヴァルト/糎	誘 電 率
雲 母	0.5—80	30,000—80,000	4.5—9.3
エポナイト	28,000	40,000	2.5
ペークライト C	100—1,000	20,000—40,000	5.5—8.9
硫 化 コ ー ム	150	1,200—20,000	2.5
綿 布 (含 浸)*	—	8,000—20,000	3.9—7.5
綿 布 (含浸せず)	0.0001—0.01	6,000	3.9—7.5
木 材	0.001—2	450—1,000	—
大 理 石	0.0001—0.1	10,000	7.8—8.9
變 壓 器 油	1	20,000—40,000	2.0

§ 40 耐熱性に依る絶縁物の分類

電氣機械捲線の絶縁には木綿、絹、紙等纖維質材料を使用する事が構造上から便利であるが、是等のものは高温に耐え得ないから機械の許容温度は自ら制限される。依つて絶縁物を其の耐熱性に依つて分類し、使用絶縁物の種類に従つて機械の使用温度の限度を定むれば便利である。第 5 表は斯様な目的の爲め各種絶縁材料に許すべき最高温度を示したものである。

第 5 表 耐熱性に依る絶縁物の分類

種類	材 料	最高温度
A	木綿、絹、紙及類似の材料をワニス類にて含浸した場合又は常に油中に浸した場合 エナメル線	105°C
B	マイカナイト、石棉紙等の如く雲母、石棉、其他高温度に耐へ得る材料を A 種材料と共に用ひ、A 種材料は單に構造上の目的に使用せられ、之が損することあるも全體として電氣的及機械的性質を害せざるもの	125°C
C	生雲母、石棉、磁器、石英、其他の B 種よりも高温に耐へ得る材料	制限なし

* 含浸とは油、ワニス其他の液状絶縁物中に浸漬して氣孔をふさぐ事である。