

硝子巻線輪と綿巻線輪との熱比較試験に就いて

富士電機 技術部 宮 森 重 二

1 緒 言

戦時下の材料節約、規格変更等により電気機械器具用巻線の絶縁物が非常に問題になつて居る時、硝子繊維により絶縁された硝子巻線が電気機械に用ひられる傾向になつて来たが従来の綿巻線と熱の傳導の點に於て如何に異なるか本實驗により明らかにせんとしたものである。しかし従来の文献等には多く硝子繊維、木綿繊維の熱絶縁物としての傳熱係数は見られるが導線に被覆した場合のものは見當らない。普通發表されて居る熱絶縁物としての硝子繊維の傳熱係数は單位體積内に含まれる繊維の重量或は熱の流れに對する繊維の方向等に甚しく左右されるもので硝子繊維を線の被覆に使用した場合その何れに相當するか判明して居ない。そこで本實驗に於ては同一寸法の硝子巻線、綿巻線を以て同形の線輪各1個を作り同一状態の下に於て溫度上昇試験を行ひその熱傳導度を比較して見た。

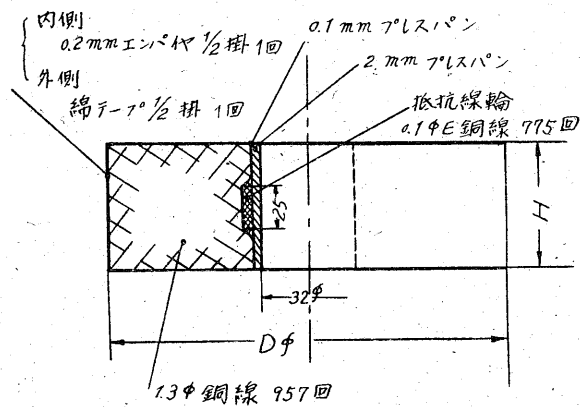
2 實驗装置及び方法

(イ) 實驗装置

實驗に用ひた線輪は第1圖の如き圓筒形のもので1個は硝子巻線銅線(直徑は 1.3/1.5φ で古河製、耐熱塗料にて處理せる含硼酸無アルカリ硝子被覆)で作リ、他の1個は同一直徑の D.C.C. で作り、その各の最内部に抵抗線輪(0.1φ E 銅線 775 回巻)を入れ抵抗變化より最内部溫度を測る如くした。尚ほ此の線輪を製協2號絶縁ワニス(菅原製)を真空壓入1回をなしその表面に0.2mm エンバイヤを掛1回、更にその上を綿テープを掛1回をなし、表面塗布2回施した。

各線輪の出來上りの大きさ、抵抗等は次の如くである。

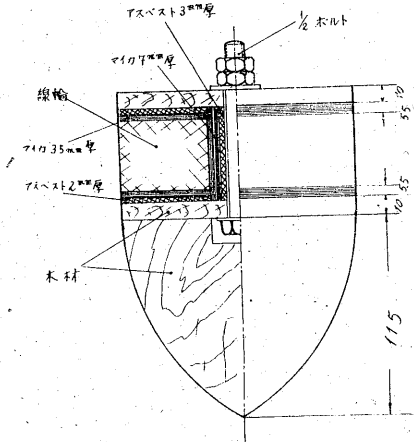
線の種類	線の直徑	線輪D寸法	線輪H寸法	抵抗 (17.5°C)	抵抗線輪抵抗 (17.5°C)
硝子巻線	1.29/1.53φ	130φ	47	3.35Ω	130Ω
綿巻線	1.30/1.55φ	137φ	45	3.50Ω	138Ω



第 1 圖

是等線輪を第2圖の如くその上下面及び内周をマイカ及びアスベストを以て覆ひその上を厚さ 10mm の木の圓板を以て上下より鐵ボルトにて押へ熱が外周面よりのみ放散する如くし更に空氣

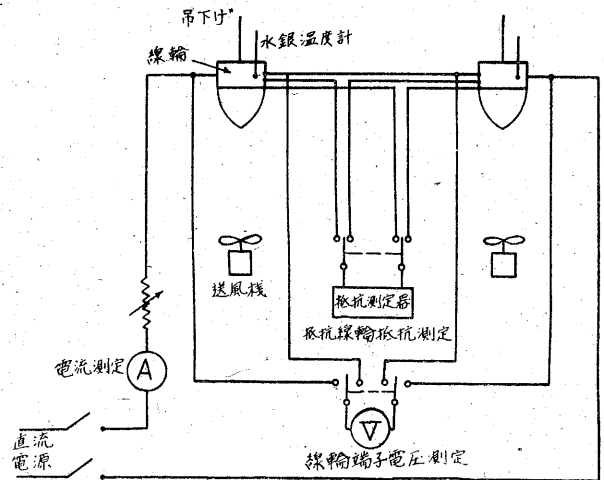
の流れが表面一様になる様に木製導風片を下取りに取り付けそれを吊して試験した。



第 2 圖

(ロ) 實驗方法

第3圖の如く2個の線輪を約 2m の間隔で吊して置き先づ線輪を直列に接続して一定通風状態の下に一定直流電流を通じ、一定時間置きに線輪外周面溫度(水銀溫度計にて)、端子電壓(電壓計にて)、抵抗線輪抵抗(抵抗測定器にて)及び室溫を測定した。



第 3 圖

通風状態並びに電流は次の如き場合に就いて測定した。

外周風速(m/sec)	電 流 (A)					
0	1.3	1.65	2.0	2.3	2.6	
1		1.65	2.0	2.3	2.6	3.0
1.7			2.0	2.3	2.6	3.0
3.0				2.0	2.3	2.6 3.0

尚ほ電流 1.3, 1.65, 2.0, 2.3, 2.6, 3.0 A は線輪電流密度夫々 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25 A/mm² に當る。

上記各場合の試験結果よりの外周面温度上昇、(以下 T_a にて表す) 抵抗法による線輪温度上昇、(以下 T_r にて表す) 最内部温度上昇、(以下 T_i にて表す) を算出した。

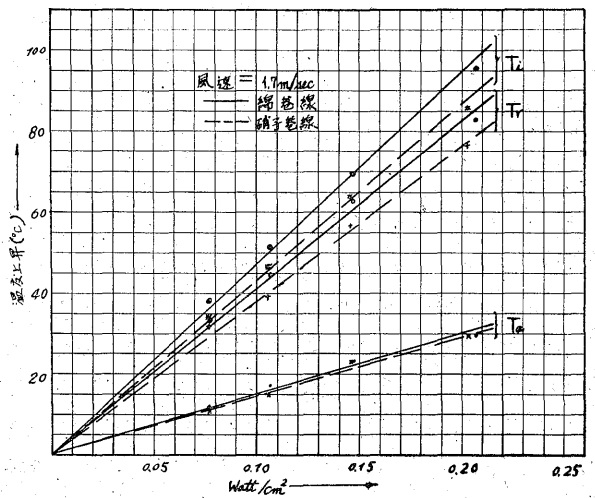
3 実験結果

(イ) 温度上昇過程

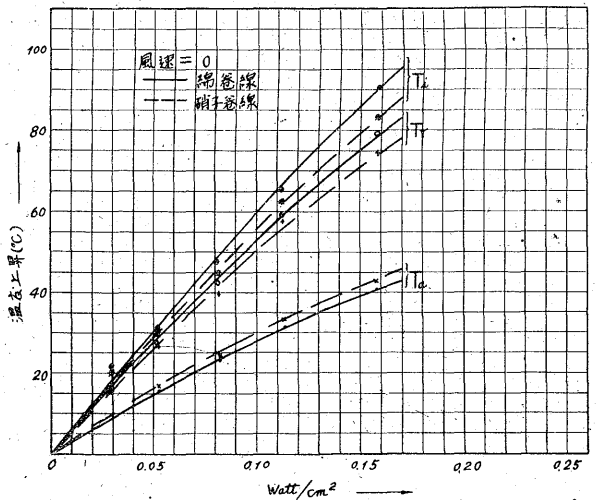
紙面の都合上各実験に於ける時間に對する温度上昇過程を示す曲線は省略したが、同一状態に於ける兩線輪の温度上昇の時定数は殆ど同じ値を示した。

(ロ) 定常状態になりたる時の温度上昇

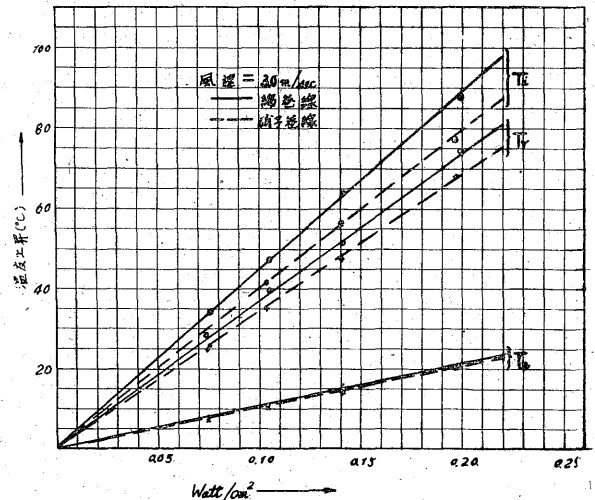
通電後 9~10 時間後放熱状態が定常になりたる時の兩線輪の外周面温度上昇 (T_a) 抵抗法に依る温度上昇 (T_r) 及び最内部温度上昇 (T_i) を線輪内損失 (端子電壓 × 電流) を各線輪外周面積にて除したるもの即ち單位外周面積當りの損失 (watt/cm^2) に對して圖示すれば第 4 圖~第 7 圖の如くになつた。



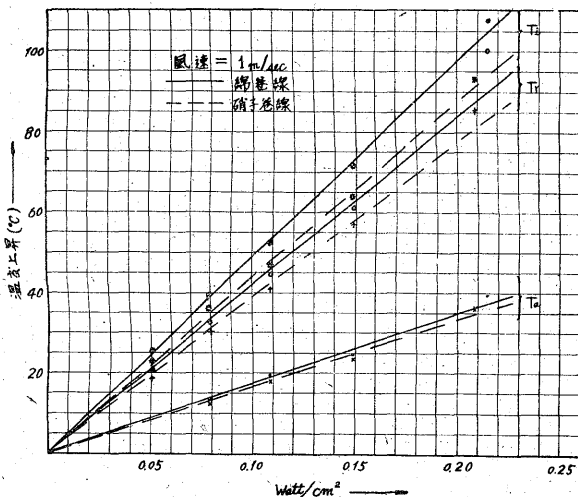
第 6 圖



第 4 圖



第 7 圖



第 5 圖

4 実験結果の検討

(イ) 温度上昇過程に就いて

同一状態に於ける温度上昇の時定数が兩線輪共殆ど同一の値を示した事は兩線輪の熱容量が略々同一である事を意味する。こ

れは線輪内部が大部分共に銅を以て占められて居るから當然の事で極く僅かな部分を占める線の被覆の材質はこの場合線輪の熱容量に影響しないのである。

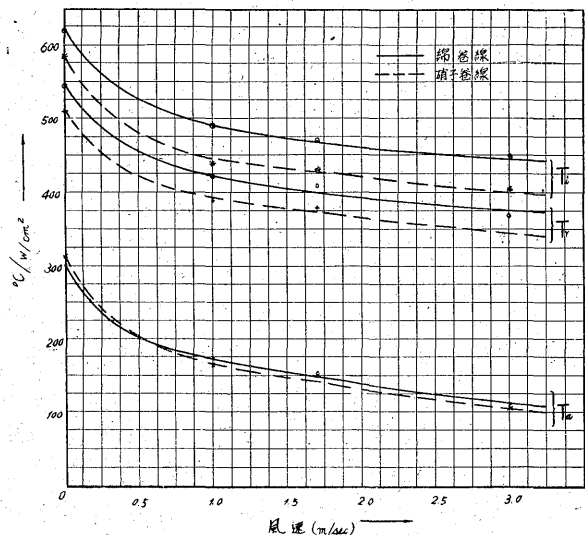
(ロ) 定常状態になりたる時の温度上昇に就いて

温度上昇の結果 (第 4 圖~第 7 圖) を見ると風速 0 以外は温度上昇と watt/cm^2 との関係は直線関係にある事が分る。そこで此れ等の直線の傾度 ($^{\circ}\text{C/watt/cm}^2$) を風速 (m/sec) に對して圖示して見れば第 8 圖の如くなる。尚、風速 0 に對しては第 4 圖の直線部分の傾度を取つた。

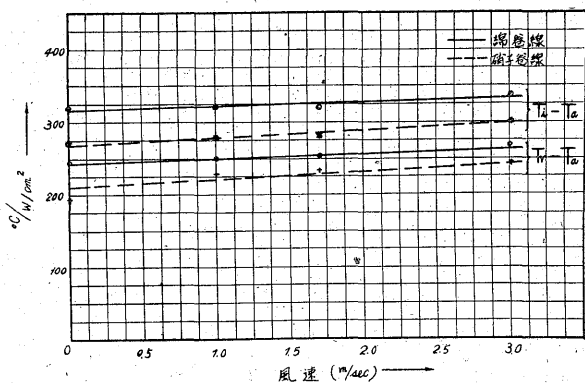
そこで第 8 圖を見ると watt/cm^2 に對する外周面温度上昇の割合は兩線輪殆ど等しくて風速に非常に影響されて居る事が解る、此れは兩線輪を同一材料で同じ状態に覆つてあるから當然の事で外周面温度は表面の状態にのみよつて左右せられるからである。

最内部温度上昇及び抵抗法による温度上昇は外周面よりの温度上昇を考へる方が適當であるので watt/cm^2 に對する $T_i - T_a$ 及び $T_r - T_a$ の割合 ($^{\circ}\text{C/watt/cm}^2$) を風速 (m/sec) に對して圖示して見れば第 9 圖の如くになつた。

第 9 圖を見ると硝子巻線に於ても綿巻線に於ても watt/cm^2 に



第 8 圖



第 9 圖

對する $T_i - T_a$ 及び $T_r - T_a$ の割合は共に風速に殆んど影響されず僅かに風速と共に増し、硝子巻線に於てはその傾向が稍々大きい。

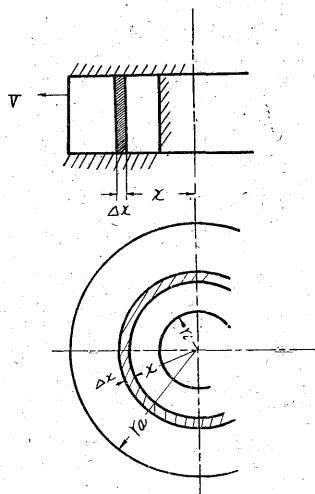
次に $T_i - T_a$ の watt/cm² に對する割合を硝子巻線及び綿巻線の場合に就て比較して見ると前者は後者の 85 乃至 90 % となり明らかに硝子巻線の方が内部の熱傳導の良し事が解る。

次に抵抗法に依る溫度上昇 ($T_r - T_a$) と最内部溫度上昇 ($T_i - T_a$) との比率を見ると硝子巻線の場合 79 % 綿巻線の場合 78 % で略々兩者相等しくなつて居る。然し此の比率は次の如き計算から推して熱が外周面よりのみ放散するとしては高過ぎる様と思はれる。そこで以下に線輪内溫度分布を檢討して見る。

今簡単に抵抗法に依る溫度上昇が最内部溫度上昇に極めて近い事實から線輪内の溫度差に依る抵抗の變化を無視して平均抵抗を用ひ近似的に線輪内部の溫度分布を求めて見よう。第 10 圖の如く圓筒形線輪に於て半径 x の所に幅 Δx なる elementary ring を考へ、線輪内の全損失を V とすれば

$$\text{半径 } x \text{ より内部に存在する損失は } \frac{V \cdot x^2 - r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \text{ であつて}$$

線輪内の損失が外周面よりのみ逸散すると考へれば上記損失は全部半径 x に於ける elementary ring を横切つて外部に向ふわけである。そこで elementary ring の幅 Δx に於ける溫度差を



第 10 圖

Δt とすれば

$$V \frac{x^2 - r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} = - Cx \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

但し C は線輪内部の熱傳導度に関する定數である

$$\text{上式は } \frac{Vx}{r_a^2 - r_i^2} - \frac{Vr_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{x} = -C \frac{dt}{dx} \dots \dots (1)$$

$$\text{即ち } -Ct = \frac{Vx^2}{2(r_a^2 - r_i^2)} - \frac{Vr_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \log x + A$$

A は積分定數

$x=r_a$ にて $t=t_a$ とすれば

$$A = -Ct_a - \frac{Vr_a^2}{2(r_a^2 - r_i^2)} + \frac{Vr_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \log r_a$$

$$\text{故に } t - t_a = \frac{V}{c(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_a^2 - x^2}{2} + r_i^2 \log \frac{x}{r_a} \right) \dots \dots (2)$$

(2) 式がこの場合の内部溫度と外周面溫度との差を與へる

$x=r_i$ の溫度を t_i とすれば

$$t_i - t_a = \frac{V}{c(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_a^2 - r_i^2}{2} + r_i^2 \log \frac{r_i}{r_a} \right) \dots \dots (3)$$

次に elementary ring の溫度を t 、この部分の抵抗を ΔR とすれば

$$\Delta R = K \frac{234.5 + t}{234.5 + t_a} x \cdot \Delta x \text{ 但し } K \text{ は定數}$$

従つてその時の線輪の抵抗 R は

$$R = \int_{r_i}^{r_a} K \cdot x \, dx + \frac{K}{234.5 + t_a} \int_{r_i}^{r_a} (t - t_a) x \, dx \\ = K \frac{r_a^2 - r_i^2}{2} + \frac{K}{234.5 + t_a} \int_{r_i}^{r_a} (t - t_a) x \, dx \dots \dots (4')$$

線輪全體が外周面溫度 t_a であつたとした時の線輪抵抗を R_a とすれば、上式より $K = R_a \frac{2}{r_a^2 - r_i^2}$

依つて (4') 式は

$$R = R_a \left\{ 1 + \frac{2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \frac{1}{234.5 + t_a} \int_{r_i}^{r_a} (t - t_a) x \, dx \right\} \dots \dots (4)$$

線輪抵抗が R の時の線輪の平均溫度を t_r とすれば

$$t_r - t_a = \left(\frac{R}{R_a} - 1 \right) (234.5 + t_a)$$

であるから (4) 式より

$$t_r - t_a = \frac{2}{r_a^2 - r_i^2} \int_{r_i}^{r_a} (t - t_a) x dx \dots\dots\dots (5)$$

$t - t_a$ に (2) 式を入れて

$$t_r - t_a = \frac{2V}{c(r_a^2 - r_i^2)^2} \int_{r_i}^{r_a} (r_i^2 \log x/r_a + \frac{r_a^2 - x^2}{2}) x dx$$

$$= \frac{V}{c(r_a^2 - r_i^2)} \left(\frac{r_a^2 - 3r_i^2}{4} - \frac{r_i^4}{r_a^2 - r_i^2} \log r_i/r_a \right) \dots\dots\dots (6)$$

(3) と (6) より $(t_r - t_a) \div (t_i - t_a)$ が求められる。

これを計算して見ると

硝子巻線の場合 $r_a = 6.45 \text{ cm}$, $r_i = 1.8 \text{ cm}$ として

$$\frac{t_r - t_a}{t_i - t_a} = 0.553 \text{ (實測値 } 0.79)$$

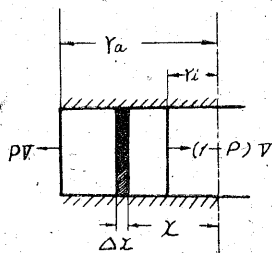
綿巻線の場合 $r_a = 6.8 \text{ cm}$, $r_i = 1.8 \text{ cm}$ として

$$\frac{t_r - t_a}{t_i - t_a} = 0.549 \text{ (實測値 } 0.78)$$

上記は温度分布を線輪内部の比抵抗が一樣であるとして求めた結果であるが實際は線輪内部程比抵抗が大なる事を考へればこの温度の比は上記計算値より更に低くなる筈で實測結果と非常に異なる事になる。此は熱の1部が内部に逸散したと考へられる。即ち最高温度が最内部でなく中部にあると推察される。

そこで内周面よりも1部の熱が逸散するとした場合を同様に計算して見る。第11圖の如く外周面より PV だけ内周面より $(1-P)V$ だけ損失が逃げたとすれば、前の場合と同様、

$$V \frac{x^2 - r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} - (1-P)V = -cx \frac{\Delta t}{\Delta x}$$



第 11 圖

これより $t - t_a = \frac{V}{C} \left\{ \frac{r_a^2 - x^2}{2(r_a^2 - r_i^2)} + \left(\frac{r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - P \right) \log x/r_a \right\}$

故に $x = r_i$ にて $t = t_i$

$$t_i - t_a = \frac{V}{C} \left\{ \frac{1}{2} + \left(\frac{r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - P \right) \log r_i/r_a \right\} \dots\dots\dots (7)$$

(5) 式を利用して抵抗法に依る温度上昇 t_r を求めると

$$t_r - t_a = \frac{V}{C} \left\{ \frac{P}{2} - \frac{r_a^2 + r_i^2}{4(r_a^2 - r_i^2)} - \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} - P \right) \log r_i/r_a \right\} \dots\dots\dots (8)$$

(7)(8) を用ひて $(t_r - t_a) \div (t_i - t_a)$ が 0.8 (實測値) であつたとして P を求めると $P \approx 0.85$ となる即ち約 15% 程度の熱が内部に逸散するとせば實測値と一致する。

更に線輪上下面よりも同時に内周面と同じ熱傳導度で損失が逸散したとして同様の計算を行つて見ると $(t_r - t_a) \div (t_i - t_a)$ の比率は熱が外周面よりもみ逸散するとした場合よりも更に小となり實測値から更にかげ離れる。そこでこの實驗では外周面の他では殆ど内周面からのみ熱が逸散したと考へられる。それは線輪を吊した鐵ボルトの影響かも知れない。然し前記比率が總ての場合兩線輪とも大體同一であつた事より總ての場合に内部に逸散する熱の割合は常に略々同一であつたと見られるからこの實驗は所期の目的を達して居ると考へられる。但し第4圖に於て風速 = 0 の場合の温度上昇曲線が直線にならなかつたのは内部に逸散した熱の割合が變化した爲で此の場合には線輪内損失が小なる時も内部温度比較的大となり内部に逸散する熱の割合が温度上昇と共に増大すると考へられる。従つて此の場合に對しては直線部の傾度を用ひ推論したのである。

5 結 言

以上の實驗に依つて線輪に硝子巻線を用ひた場合は綿巻線を用ひた場合よりも内部の熱傳導度は良好であり、従つて外周面と内部との温度差は低い事が定性的に判明した。元來硝子纖維絶縁はB種絶縁物に屬するものでこれを使用すれば機器の温度上昇限度を木綿絶縁即ちA種絶縁物に比して高く採る事が出来るのであるが斯様な目的でなく單に綿巻線に代置した場合を考へても内部温度の點で綿巻線よりも有利である。従つて電磁線輪、直流機分巻界磁線輪或は小型同期機の界磁線輪等に於て硝子巻線の使用が考へられる。又圓筒形或はそれに類似の線輪でない場合即ち型巻固定子線輪等に硝子巻線を使用した時綿巻線を使用した場合に比較して熱傳導度は如何になるかもこの實驗で概念が得られたと思ふ。

終りに本實驗の施行並びに本稿起草に就いては當社第一設計課長大富眞氏の指導に依るもので、茲に記して深甚なる謝意を表する。
(終り)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。