

多層撚同軸ケーブルの概要とその内部導体銅テープ に要求される諸性質について

杉 正 男 ・ 笹 川 征 男

1. 緒 言

伝送線路の電気特性を支配する二要素である導体と絶縁物とにおいて、後者は年代とともにいちじるしい進歩改良をみてきたが、前者については材料的に進歩が困難であり昔とほとんど変わらないといっても差し支えない。したがって、通信用低損失線路の導体としてはもっぱら銅を単線として、太いものでは時に円筒状で使うことが最上となっている。しかしながら、導体についても、表皮作用がいちじるしい高周波の領域では、実効抵抗の増大を抑えるために構造上の工夫が役立つ可能性がある。多層撚導体はこれを実現したものであり、顕著な効果が期待できる。

通常の円柱導体において周波数が高くなると導体表面に近いほど、電流密度が大となることは表皮作用としてすでに知られている。この場合、円柱導体を多くの導体層に同軸状に分割し、導体層の厚さを、その周波数の等価導体厚に比して小とし、かつ、各導体層に適当な撚りを与えるとこの撚りによるインダクタンスの作用で、円周方向磁界の作用による本来のインダクタンスの作用を打ち消して表皮作用を防ぎ、各導体層に流れる電流を均一化し、抵抗損失の少ない高周波導体を得ることができる。これが多層撚導体と呼ばれるものである。

このように、各導体層は等価導体厚に比して薄く、規定の撚りで、極めて薄い絶縁層を介して、順次螺旋状に纏巻し、かつ、厳密な外径に構成しなければならないために、導体層として使用される導体テープは上述の要求を満足し、導体製造上に支障を与えないような電気的・機械的特性を具備しなければならない。これは、極めて薄肉の導体テープ、通常は銅テープを、厚み、幅、ともに厳密な公差内で、しかも、かなり高度の機械的、電気的特性を与えるように製造せねばならないということであり、導体製造にあたっては、かなり高度のテープ巻技術を必要とすることを意味している。ここに述べる多層撚同軸ケーブルは多層撚導体を内部導体とし、外部導体は従来通りの普通構造としたものであって、これと同外径の普通構造の同軸ケーブルに比べて、抵抗損失を約30%程度、低減することが容易である。

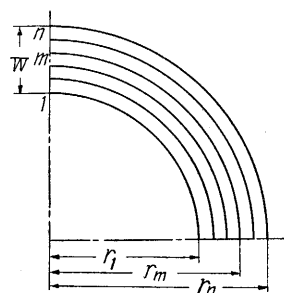
以下に、多層撚導体の理論ならびに多層撚導体を応用

した同軸ケーブルの設計例と、その多層撚内部導体用銅テープに必要な諸性質の概要を述べる。

2. 多層撚導体による表皮作用の低減

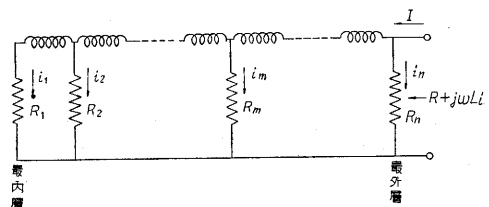
(1) 原理

第1図に示すように中空円柱導体を無限に薄い、互いに絶縁された導体層に分けて考える。各導体層の抵抗、およびインダクタンスは半径 r の函数であって周波数の函数ではないが、それぞれ互いに異なっている。したがって、高周波では自己、および、相互インダクタンスが



第 1 図

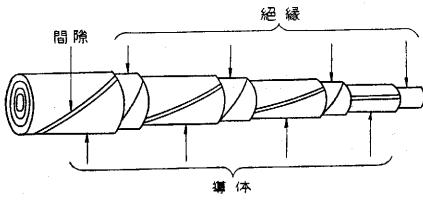
外側の導体層ほど小さいために電流密度は外側ほど大となる。これが表皮作用として知られている現象である。この構造の導体の等価回路を示すと第2図のようになる。端子からみたインピーダンスは並列要素の各層の抵



第 2 図

抗と直列要素の内部インダクタンスに関係する。この場合、もし各層に撚りを与えることにより、軸方向磁束によるインダクタンスを与え、これを相対的に適当に調節すれば円周方向磁束による本来のインダクタンスの作用、すなわち、表皮作用を打ち消すことができる。

この具体的な方法としては、たとえば各層を銅テープの螺旋巻で構成し、この螺旋ピッチを所定の法則にしたがって最内層から外側へ向かって漸次小とすればよい。ただし、各層は電流を螺旋状に流すために銅テープの端を完全に突き合わせず僅かの間隙を設け、また各層間は接触しないように薄い絶縁を施すことが必要である(第



第 3 図

3 図参照).

上述の理論は導体層の厚みが無限に薄い場合であるが、実際には有限厚み t の導体層により構成される。この場合、各導体層内には並列回路の電流の相互作用によって表皮作用を生ずるから、この場合の等価回路に第 2 図の直列要素のインピーダンスに抵抗分を含むことになり複雑となる。

一般に、導体厚 t なるテープで構成する多層撚導体では同外径の充実、あるいは中空円柱導体より実効抵抗を小さくするためには次の条件を満足する必要がある。

$$t \leq \vartheta < nt \dots \dots \dots (1)$$

ここに

n = 全導体層数

ϑ = 等価導体厚

$$\vartheta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_s}}$$

- ρ = 導体材料の固有抵抗
- $\omega = 2\pi f$, 電流の角速度
- μ_s = 比導磁率
- μ_0 = 真空の導磁率

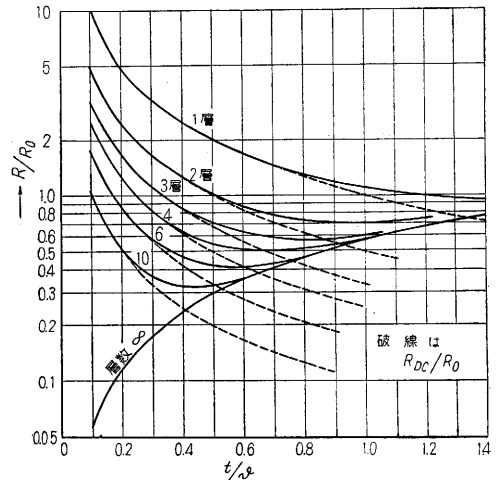
すなわち、 t を ϑ とほぼ同等、またはそれ以上に薄くする必要がある。また、導体層の総計厚み W は最外層のピッチに大きな影響を与えるものであり、

$$W \ll r \dots \dots \dots (2)$$

でなければならない。これはいいかえれば、表皮作用の顕著な条件において、多層撚導体の効果が大きいことを示している。これらの条件において、いかなる設計で、いかなる効果が期待できるかを定量的に明らかにすることは、一般に簡単ではないが第 2 図の直列要素に抵抗が挿入された対称 T 型四端子網の縦続接続回路と考へ(1)(2)の仮定から実用上は十分差し支えない程度の結果を得ることができる。

(2) 実効抵抗低減の効果

多層撚構造において理想状態が実現された時、電流は各層の抵抗によって分布し、ケーブルの抵抗 R は最小になる。これが理想分布である。この時の R の値と同外径の充実、あるいは中空円柱導体の実効抵抗 R_0 との比 R/R_0 は t/ϑ の関数として第 4 図に示した。破線は直流抵抗 R_{DC} と R_0 との比である。ただし、各層等しい厚さの場合であり、撚込みによる抵抗増加は考慮されて



第 4 図

いない。第 4 図から判るように R/R_0 は与えられた層数に対して、ある t/ϑ において最小値を示し、この最小値は層数が増すほど小となり、 t/ϑ も減小する。 $n=2$ 以上では R/R_0 最小の t/ϑ は 1 より小さい。 $t/\vartheta < 1$ が成立する範囲では近似的に

$$R = \left[R_0 \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{t}{\vartheta} \right] / \tanh \frac{n}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{\vartheta} \right)^2 \dots \dots \dots (3)$$

R の最小値を与えるための導体層の最適厚み $Topt$ も近似的に

$$Topt = 1.36 \frac{\vartheta}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (4)$$

で与えられ、この時の Ro_{pt} は

$$Ro_{pt} = 0.98 \frac{R_0}{\sqrt{n}} \approx \frac{R_0}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (5)$$

となる。

また、第 2 図において、ケーブルの抵抗 R には外層の抵抗ほど、大きく作用するから同一層数ならば内層の導体を厚く、外層を薄くすることが有利であって各層の導体厚を変えた場合の最適のテープ厚、および R/R_0 の関係は層数 4 層までについて示すと第 1 表のとおりである。

第 1 表

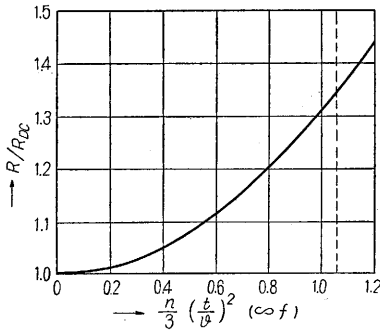
導体層	最適 t/ϑ	その層で打ち切った時の R/R_0 (%)	各層同一厚の時の最小 R/R_0 (%)
第 1 層	1.40	93	93
第 2 層	0.75	63	70
第 3 層	0.55	51	57
第 4 層	0.45	44	49

(3) 実効抵抗の周波数特性

(3)式より R/R_{DC} を求めると、 $t/\vartheta < 0.7$ において近似的に

$$\frac{R}{R_{DC}} = \left[\frac{n}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{\vartheta} \right)^2 \right] / \left[\tanh \frac{n}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{\vartheta} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (6)$$

となり、 $n(t/\vartheta)^2/\sqrt{3}$ に比例するから第 5 図のように、 T_{opt} に対応する $n(t/\vartheta)^2/\sqrt{3}$ は 1.065 である。



第 5 図

(4) 各導体層に与えるべき撚り

理想電流分布を生ずるために各層に与えるべき撚りは、隣接層間に存在するそれぞれの自己および相互インダクタンスを総合した実効インダクタンスの差を無くするように決定される。いま、

$$t < 0.7 \frac{\vartheta}{\sqrt{n}}, W \ll r \dots\dots\dots (7)$$

なる条件を仮定し、各層同一厚の導体を使用したとすると各層の撚りは、近似的に

$$\left. \begin{aligned} \text{最内層} & \quad \varphi_1 = 0 \\ \text{第 } m \text{ 層} & \quad \varphi_m = \sqrt{\frac{3W}{r} \frac{m(m-1)}{n\sqrt{n^2-1}}} \\ \text{最外層} & \quad \varphi_n = \sqrt{\frac{3W}{r} \frac{n-1}{n+1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となる。撚り φ_m とピッチ P_m の間には

$$\varphi_m = 2\pi r / P_m \dots\dots\dots (9)$$

なる関係がある。ただし、 r は導体の平均半径、(8)式はピッチの逆数、撚りを最内層からほぼ、2次函数的に増加させることを意味している。実際の場合の詳細な計算については省略する。

3. 多層撚同軸ケーブル設計例

次に具体例として、各層の導体厚の異なる設計例を示すが、各層同一厚とした場合よりも少ない層数で同等の電気的特性を得、これにより製造の簡易化、機械的に安定した構造を得ることができる。

(1) 設計条件

- 回線数 電話 480 通話路
- 使用周波帯 60 kc ~ 2.044 Mc
- 減衰量 約 2 db/km at 2.044 Mc

と仮定する。内部導体は多層撚導体とし、外部導体は普通構造の同軸型とする。絶縁はポリエチレン充実とする。

(2) 内部導体 (多層撚導体)

外径 5 mm のポリエチレン紐を絶縁心とし、その上に

厚みを変えた軟銅テープを間隙、約 0.5 mm 開けて巻く。導体層間は 0.0125 mm 厚のマイラーテープにて絶縁し、最外層には押え巻として、0.025 mm 厚のマイラーテープを用いる。本ケーブルにおいては内部導体の外径 5 mm、外部導体内径約 20 mm とし、周波数 2 Mc において 2 db/km を得なければならないから、減衰量低減率としては約 25% とれば良い。したがって、多層撚内部導体としては約 35% 低減できれば良く、3 層とし、かつ完全に最適厚の構成とせず、多少厚目に導体厚を探ることができる。ここで、最高周波数 2 Mc における銅テープの等価導体厚 ϑ は 0.0463 mm であるから、最適厚より多少厚目にとって第 2 表のように決定する。なお各層のテープ巻ピッチ、テープ幅も併せて示すが、最内層は縦添とし、巻方向は右巻とする。

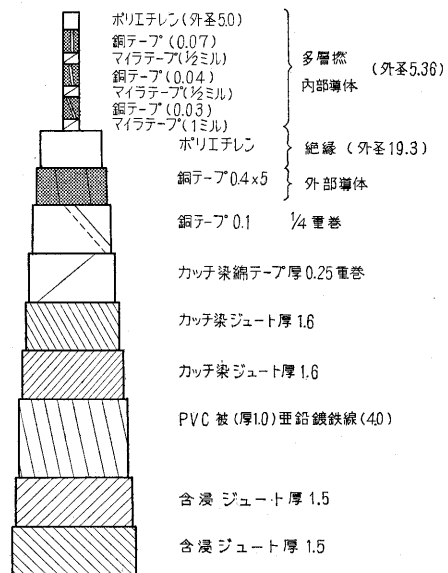
第 2 表

導体層	最適導体厚	使用銅テープ厚	使用銅テープ幅	テープ巻ピッチ
最内層	0.065	0.070	15.4	∞
第 2 層	0.035	0.040	15.7	111
最外層	0.025	0.030	15.3	49

(単位: mm)

(3) ケーブル構造

ケーブルの構造は第 6 図に示すように内部導体外径 5.36 mm、外部導体内径 19.3 mm、補強外装は海底ケーブルへ応用するために付加されている。



総外径 約 44 mm

第 6 図 多層撚同軸海底ケーブル構造

(4) ケーブルの特性

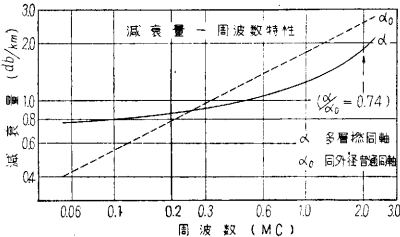
導体はすべて銅を使用し、その導電率は 100% (1.724 $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$)、銅テープ寸法の変動は厚み、幅ともに

2%以内に入っているものと仮定した。ポリエチレン絶縁の誘電率=2.3, 誘電体損失=4×10⁻⁴とし, 2次元数の計算値は次のとおりである。

特性インピーダンス Z₀≈51 Ω

減衰量 α=1.9 db/km

減衰量の周波数特性, および普通同軸ケーブルとの比較は第7図に計算値を示すが, 2Mcにおいて, 26%の減衰量低減を期待できる。



第7図 480CH 多層燃同軸海底ケーブル

(5) 普通構造同軸ケーブルとの比較

内部導体を従来のように銅単線とした普通構造同軸ケーブルと多層燃同軸ケーブルとについて減衰量, 寸法などについて比較すると次のとおりである。

同一減衰量を与える場合の寸法を第3表で比較する。ただし, d₂/d₁比を一定とする。

同一外径を与える場合の減衰量を第4表に示す。ただし, 周波数 2.044 Mc における値である。

第3表

種別	d ₁	d ₂	比率	備考
多層燃	5.36	19.3	0.72	d ₁ : 内部導体外径 (mm)
普通	7.40	26.6	1.00	d ₂ : 外部導体内径 (mm)

第4表

種別	減衰量 (db/km)	比率
多層燃	1.87	0.74
普通	2.54	1.00

以上のように, 同一減衰量を与える場合, 多層燃同軸ケーブルでは普通構造同軸ケーブルよりも28%細くても良く, 同一外径では26%減衰量が少ないことを示し極めて優れた特長を有することを示している。

この場合, 低減効果は(導体半径)≫(等価導体厚)の条件で顕著であるから, とくに, 中継器距離の長い, 低減衰量を要する, 比較的太い導体を使用する同軸型海底ケーブルには極めて有利となる。

4. 多層燃導体用銅テープに要求される諸性質

既述のように多層燃導体の各導体層に使用される銅テープは, その使用最高周波数に対する等価導体厚 ϑ と

ほぼ等しいか, さらに薄い厚みのものが使用される。もちろん, 使用周波数, 導体層数, 各層異なる厚みの構造などにより決まるが, 現在, 必要とされるケーブル線路としては最高周波数が4Mc(960通話路)程度であり, 銅の ϑ は0.033mmとなる。実用的には前節の設計例で述べたように, 層数は3~4層で, 各層異なる厚みとすることが望ましいから, 4Mcの設計では銅テープの厚みは0.046~0.015mmとなる。また2Mc(480通話路)では0.065~0.025mmの銅テープが必要であることが判る。なお, 多層燃導体の設計においては, t/ϑ によって計算が進められ, 電気的特性が決定されるから, 銅テープ厚 t の変動が当然, 特性の変動をもたらすことが理解される。もちろん, 銅テープの導電率の低下はそのまま高周波損失の増加をきたし, その機械特性は多層燃導体製造に重大な影響を与えることは言を待たない。

(1) 銅テープ厚みの変動

銅テープの厚みの変化による高周波実効抵抗への影響について検討してみよう。簡単のために, 各層が同一厚みの場合について考えてみる。(6)式より

$$\frac{n^2 \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^4}{3} < \frac{\pi}{4} \text{ において, 近似的に}$$

$$R/R_{DC} \approx 1 + \frac{n^2 \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^4}{9} \dots\dots\dots (10)$$

が成立するから, 実効抵抗変化と銅テープ厚変化との関係式は

$$\frac{dR}{R} \approx - \frac{1 - 3 \left(\frac{n}{3}\right)^2 \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^4}{1 + \left(\frac{n}{3}\right)^2 \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^4} \frac{dt}{t} \dots\dots\dots (11)$$

となり, 厚み変化と実効抵抗変化とは互いに逆の関係にある。この場合は各層の銅テープが同時に同じように変化したと考えており, 実際とは多少条件が異なるが一応の傾向を知ることができる。

Δt/t による R の変化は周波数により異なり, 最高設計周波数付近では厚み変化の効かない周波数もあるが, 一般には, これ以下で使用される。周波数帯域を広くとった場合は, 低周波では R≈R_{DC} となり, dR/R≈-dt/t となり, 厚みの変化が直接影響するが, 低周波であるため, 減衰量自身も少ないから, ケーブルの伝送特性には, それほど影響しない。

したがって, 最適周波数の80%程度の周波数付近で厚み変動による実効抵抗の変化を考慮することとすれば dt/t が dR/R を与えない最適周波数では

$$(n/3)^2 (t/\vartheta)^4 = 1/3$$

であるから, 最適周波数の80%の周波数では

$$(n/3)^2 (t/\vartheta)^4 = 1/2$$

であり, 多層燃導体自身の実効抵抗変化は,

|ΔR/R| ≈ |Δt/3t| となる。しかしながら, 多層燃同軸

ケーブルとしては、外部導体の占める実効抵抗も考慮せねばならない。内、外部導体の直径比を約 1/4 とし、内部多層燃導体としての実効抵抗低減率は、普通、約 30% であるから、内部導体の実効抵抗変化の同軸ケーブルの実効抵抗への影響の程度は約 70% であり、ゆえに内部多層燃導体の銅テープの肉厚変化による多層燃同軸ケーブルとしての実効抵抗の変化は、

$|\Delta R/R_0| \approx |\Delta t/4t|$ となる。したがって、同軸ケーブルとしての $\Delta R/R_0$ を 0.5% 以下に抑えるには $\Delta t/t$ を 2% 以内に規制する必要があるといえる。

なお、厚み変動によりピッチが変化し、特性が変わるが、これは極めて少ないので無視できる。

(2) 銅テープ幅の変動

次に銅テープの幅変動について考えてみる。

銅テープ幅の変動 dW/W は直ちに抵抗の変動 $\Delta R/R$ に影響するから、幅のみについて考えれば同軸ケーブルとして、 $\Delta R/R_0$ を 0.5% 以下とするには dW/W を 0.7% 以下にしなければならない。しかしながら、テープ幅公差に規制を与えるのは $\Delta R/R_0$ のみでなく、銅テープのテープ巻ピッチの変動がある。

銅テープは、各層ごとに異なる精密なピッチで、テープ巻され、積層されるが、ピッチの多少の変動は避け得ないことである。一方、導体断面積を増し、抵抗値を減らすために、各層の突合せ部での間隙は、なるべく小さいことが望ましいので、この間隙は普通 0.5 mm 以下とし、間隙による抵抗増加が 2% 以下になるように決定する。したがって、テープ幅の小さなものでは間隙がかなり狭くなる。このような場合、テープ巻ピッチに変動があると間隙が変動し、テープ端が互いに接触するようになるから、考えられるピッチ変動によっても、テープ幅公差は制限を受ける。すなわち、テープ幅 W は、

$$W = 2\pi r (1 + \varphi^2)^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (12)$$

ここに r ; 各層のテープ巻半径

であるから、間隙のテープ幅に対する変化 dg/W とテープ巻ピッチ変動 $\Delta P/P$ との関係は次式のようになる。

$$\frac{dg}{W} = \frac{2\varphi^2}{(1 + \varphi^2)} \frac{dP}{P} \dots\dots\dots (13)$$

たとえば、先の設計例では $\varphi_1=0$, $\varphi_2=0.148$, $\varphi_3=0.345$ (1, 2, 3 は第 1, 2, 3 層を示す) であり、テープ幅は平均 15.5 mm であるから、間隙は約 2% として 0.3 mm 以下であることが必要である。

また、テープ巻のピッチ変動を 3% 以下とすれば、第 3 層では、間隙は銅テープに対して $\pm 0.6\%$ 変動することになる。ピッチ変動がある程度、避け得ないものであるならば銅テープ幅の変動を規制しなければならず、上の例では、銅テープ幅公差を 0.7% 以下としなければならない。もちろん、公差はピッチ変動のみならず、

電気的な要求からも考慮されねばならない。

(3) 銅テープ導電率

導電率の低下は、ただちに実効抵抗を増加せしめることは当然である。多層燃導体の設計においては、導電率 100% と仮定しているから、実効抵抗の変動を、0.5% 以下とするためには、銅テープの導電率を 99.5% 以上とし、かつ、偏差を 0.5% 以内にすることが望ましい。なお、設計計算においては、各層の導体の導電率はいちように 100% としているから、各導体層間についても、上記の公差が守られねばならない。

(4) 機械的特性

多層燃導体は極めて薄い導体層をテープ巻積層して構成するが、原理上、その構成が極めて重要である。特に寸法的な点で厳密さが要求される。従来の導体ではダイスなどで、規定の外径を得ることができたが、多層燃導体では、薄い銅テープを使用しているために、ダイスなどで外径を均一にすることができない。そこで、内部の絶縁心、銅テープ、絶縁テープなどの寸法を厳密な公差に抑え、これをテープ巻構成することによって所要の外径に仕上げるように考えなければならない。したがって、外径は、テープ巻の張力によりある程度影響されるが、寸法精度を維持する上においては張力はなるべく大きい方が望ましい。このように、銅テープにはかなりの強度が要求されることになり、薄肉のものになるにしがたい、機械的強度の低下するのに反して、要求はますます苛酷なものとなる。

まず、テープ巻における張力は従来の経験によれば 0.3~0.5 kg 以下では、張力が小さく、安定した満足なテープ巻が困難であった。すなわち、これ以下では精密な外径とピッチが得られなかった。これまで、すでに市販されている各種の薄肉銅テープについての諸特性は第 8 図に示すとおりであるが、この結果より、引張強度について考えると、銅テープの弾性限を抗張力の 15% として銅テープ幅、約 15 mm のものでは、0.03 mm 厚以下では、上記の必要な張力を得ることは、銅テープに永久歪を与える可能性があり、使用が困難であることが推測される。事実、0.03 mm 程度ではテープ巻における張力を調整し、良好な条件を得ることはかなり困難なことである。もちろん、テープ幅の狭いものではさらに厚い場合でも十分な強度を有していないことはいうまでもない。逆に、抗張力について考えれば、厚み 0.03 mm 幅、約 10 mm として 10 kg/mm² 以上必要であるといえる。

以上は張力の最低限から考えた所要引張強度であるがテープ巻においては、巻付心の可撓性などのため、過大なテープ巻張力を加えることも、テープ巻後の外観を悪くしたり、テープに伸び、切断を生ぜしめたりする。過去の実績によれば、5~8 mm の外径に薄肉の銅テープ

を巻いた場合、張力過大によるシワなどの発生は約 1.5 kg 付近で発生することが知られている。したがって、以上のことから、薄肉銅テープのテープ巻では、銅テープに永久歪を与えぬような範囲で、約 0.5 kg 程度の張力で巻くことが望ましい。しかし、これまでは、引張強度の優れた薄肉銅テープを市販品の中に見出すことは困難であった。

また銅テープは、テープ巻作業においても多少の伸びを与えられる(約 1~2%)ものと考えられるが、さらに後のケーブル製造工程において、かなりの温度差の変化を与えられる。中心の絶縁心は現在、ポリエチレンを使用しているため、その膨張に伴って、5%近い伸びを受ける。この伸びは、主として、テープの長さ方向に直角に与えられるが、このような外力によって銅テープが、切断するようなことがあってはならない。また、多層燃導体テープ巻後、導体はドラムなどに巻きとられるが、この際、導体の外面では伸びを、内面では圧縮を受ける。この曲げにより銅テープが挫屈しないような曲げ直径と導体径の比を 80 倍とした場合、外面において、2%の伸びを受けると考えられる。

このようなことから、銅テープに必要な伸びは、長さ方向(圧延方向)直角方向とも、最低、7~8%必要であることが判る。一般に、伸びは抗張力とともに薄肉になるにしたがい低下するから、この要求はかなり苛酷なものかも知れない。

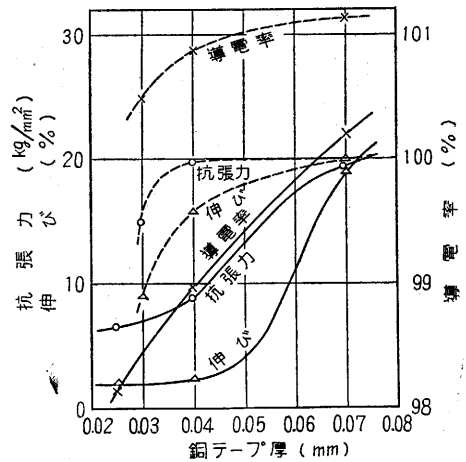
その他、銅テープに要求される事項には、銅テープ端面の形状の問題がある。一般にテープは幅広に圧延後、所定幅に切断するが、通常のスリッタは剪断により切断するので、切断端の片側にカエリが生じ、そのためテープ巻後、極めて薄い絶縁層が破られ、導体層が互いにところどころで短絡することになる。少数の層間の短絡は特性にそれほど影響を及ぼすものではないが、頻繁に生じた場合は特性を多少とも悪化させるから、なるべく、端面のカエリのないように、切断方法、または他の方法を考慮する必要がある。

さらに切断において考えなければならないことはテープの蛇行であるが、これが激しいとすでに述べたように微小な間隙部において短絡を生じたり、テープ巻作業に支障を来すことになる。

また、銅テープとしての一連の単長は、同軸ケーブルとしての製作単長が 1 km であるので、一層を無接続でテープ巻すると考えれば、テープ巻による燃り込み、作業余長、作業ロスなどを合せて 1.3 km 単長の銅テープが必要である。

(5) 薄肉銅テープ特性の一例

これまで検討した現在市販されている薄肉銅テープの特性の一例は第 8 図に示したが、抗張力・伸び・導電率はいずれも、銅テープ厚の減少に伴って低下している。



凡例 { — A社素材 0.4 mm厚
 --- B社素材 0.2 mm厚

第 8 図 薄肉軟銅テープ特性

圧延は特定のある社の協力によるが、A社の素材は厚さ 0.4 mm、B社の素材は 0.2 mm であり、以後の圧延法に大差はない。A社とB社の大きな差は加工歴の違いによるものではないかと考えられるが、とにかく、A社素材のものでは 0.04 mm 以下では、多層燃導体用テープとしては使用困難である。B社素材のものについても、0.03 mm 厚で特性は急激に低下しており、やはり要求に適さないと考えられる。ただし、導電率については十分満足する特性が得られている。厚み、幅などについて、一例を示せば、厚みについては 0.04 mm までは平均肉厚に対するばらつきは 4%以下であるが、要求肉厚に対する最大偏差は平均 7~9%であり、0.03 mm 以下のものでは上記の数字はそれぞれ 4~13% および 10~12%であった。したがって、厚み変動の点では極めて悪いといえよう。

また、幅については 12.0~18.0 mm の範囲で、平均値は公称値に対し ± 0.1 mm 以下であり最大 0.7% 以下であった。

なお、銅テープは所要の特性を与えるために、軟化されるが、薄肉銅テープでは軟化はかなり難しい問題で、0.03 mm 以下のものの幾つかは軟化により、パッド状に巻かれた銅テープ間で密着し、繰出し不能のものも見受けられた。

銅テープの端面の状態は、スリッタの刃の形状を変えたものについて、二三検討したがいずれも剪断による切断法を採用していたので、端面でのカエリの問題は解決できなかった。

銅テープの単長については、この例では 50~100 m と、種々であったが、所要長に対しては極めて短く不十分なものであった。現在の市販品については、銅テープ

パッドの外径の制限、圧延時の切断など、製造上の問題を考慮すれば止むを得ないこととも考えられる。

(6) 多層燃導体用銅テープに必要な性能

所期の性能の多層燃導体、すなわち、多層燃同軸ケーブルを得るためには、上述の種々の要求を満足する銅テープを必要とすることは明らかである。これらの所要性能をまとめて示すと次のとおりである。

- (1) 寸法公差 厚み ±5.0%以下
(最終目標 ±2.0%)
幅 ±0.5%以下
- (2) 電気的特性 導電率 99.5%以上
- (3) 機械的特性 第5表のとおり。他の寸法のものについては、これに準ずる。
なお、圧延方向およびその直角方向についてもこの規格を満足すること。

第 5 表

公称厚さ	抗 張 力	伸 び
0.07 mm	20 kg/mm ² 以上	20 % 以上
0.04	20	20
0.03	15	15
0.02	10	10

- (4) 単長 1300 m
- (5) その他 切断端はカエリの出ないようにすること、また、切断時にテープが蛇行せぬように注意すること。
変色、および異物の付着していないこと。
圧延油などの付着量の少ないこと。
テープは規定の巻枠に堅く、均一に巻かれ、後の正常の取扱において、層崩れ、端折れなどの生じないこと。

銅テープの使用にあたっては、細心の注意が払われつつ、作業が行なわれるが、銅テープ自身としても以上のような高度の性能が要求されるわけであり、完全な多層燃同軸ケーブルを製作する上において、その原理、構造上、必要欠くべからざる要求であることが理解されるであろう。

5. 結 言

高周波において抵抗損失をいちじるしく低減することのできる多層燃導体の理論の概要とその応用設計例として、多層燃同軸ケーブルの一例について、その優れた電気的特性を述べ、多層燃導体構成の中心を成す薄肉銅テープについて、設計、ならびに製造上からの要求を示すとともに、これまでの市販品の銅テープにあつては、この要求に適合するものが得られなかったことを、検討例を掲げて述べた。多層燃同軸ケーブルの研究、開発にたずさわる筆者らとしては、その特性を大きく左右する銅テープの特性が改善され、優れた銅テープが開発されることを久しく望んでいた訳であるが、このたび東京大学生産技術研究所鈴木教授、および当社研究部金属課のご理解とご努力の下に優秀な薄肉銅テープが製造できるようになったことは、薄肉銅テープを利用する者の一人として誠に喜ばしいことであると同時に、薄肉銅テープ製造技術開発研究に捧げられた努力と技術に対し深く敬意を表するとともに感謝する次第である。

ここに述べた多層燃同軸ケーブルと同様の目的で提唱された高周波導体は数多いが、すでに他に先がけて、理論の実証、および実用化への明かるい見透しを得ていることは、このたびの薄肉銅テープの開発によって、ますます、確立され、新しい伝送線路の一つとして、多層燃同軸ケーブルに近い将来実用に供し得ることを十分期待させるものといえよう。

なお、多層燃導体、および多層燃同軸ケーブルの研究、開発に関しては、これまで対外的、全社的に多くの方々のご協力とご援助をいただいた。衷心より感謝の意を表する次第である。(1961年10月12日受理)

参 考 文 献

- (1) 杉：多層燃合導体による表皮作用の低減 昭 30—3 電学誌
- (2) 杉，村井：多層燃合構造の同軸導体 昭 30—10 通信学会秋季大会
- (3) 杉，村井：多層燃合導体による表皮作用の低減 昭 30—12 住友集報 No. 58
- (4) A. M. Clogston, Reduction of Skin Effect Losses by the use of Laminated Conductors. BSTJ. 30 July, '51
- (5) 杉，村井：高周波用電気導体 特許公報 昭 29—6685
- (6) 杉，村井，河添，笹川：多層燃同軸海底ケーブルの特性について 昭 33—5 電四学連大 No. 1103
- (7) 杉，河添，笹川：異なる厚さの素導体による多層燃同軸海底ケーブル 昭34—4 電四学連大 No. 1095

