



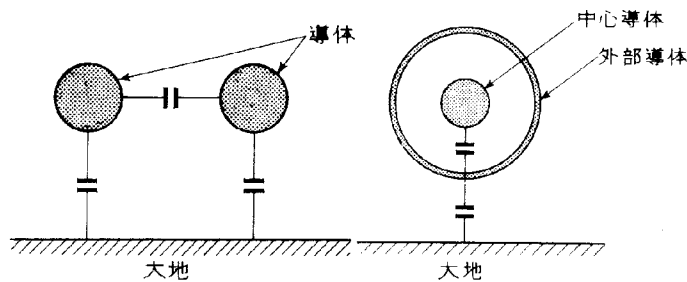
「オーディオ・ケーブルはなぜ同軸か？ バランス伝送の提案」

根岸邦夫

L Pレコードが全盛であった一昔前は、カートリッジやトーンアーム等を容易に交換でき、それなりの楽しみ方があった。しかし、現在のCD全盛においては、素人が簡単に装置をいじくり回すわけにはゆかなくなった。このような状況の中で、残された容易に交換可能な部品として、機器間を接続するケーブル類が存在する。そういった現状を反映してか、セットメーカーやケーブルメーカーから数多くのケーブル類が発売され、オーディオ雑誌にもケーブル関係の記事が多く掲載されるようになってきた。

しかしケーブルは、かつて導通していれば良い存在であったがために、導体材料を除けばほとんど議論されることがなかったといえる。それがゆえに紆余曲折も多く、また、それらがいとも簡単にノーチェックで受け入れられてはいないだろうか。

本連載は、以上の点を踏まえてケーブルに関する基本問題を、技術者の立場から取り上げるものである。



〈第1図〉バランス型

〈第2図〉アンバランス型

ケーブルが注目されはじめ、一部のアンプには、キャノン型の出力端子を有しているものも出現している。ここでは、バランス型とアンバランス型の違いや、それぞれどんな利点を有しているのかについて分析してみよう。

ケーブルは構造および結線方法により、バランス型とアンバランス型に区別できる。バランス型とは第1図のように往復線路を構成する導体がほぼ等しい構造をしており、電氣的にも大地(接地電位)に対し等しい関係にあるものをいう。バランス型ケーブルの代表は対型ケーブルである。

一方、アンバランス型とは、往復する2線が構造および電氣的に同一条件にないものをいい、同軸ケーブルがその代表である。同軸ケーブルでは、中心導体は外部導体を介して大地に至るのである(第2図)。

このように、ケーブルはその構造やシールド処理の仕方によって、バラン

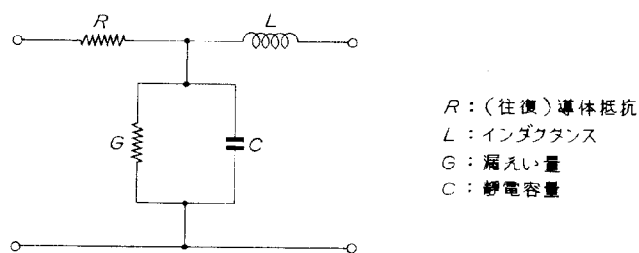
正しい知識で、紆余曲折している概念を正しく理解して載せ、また“自分の好みの音”がするケーブルを捜し求めている読者の一助になればと考えている。

バランス(平衡)とアンバランス(不平衡)型

最近、バランス型のオーディオ・ケ

項目	バランス型(2芯ケーブル)	アンバランス型(同軸ケーブル)
構造	導体: $d=1.0\text{mm}$ ϕ 銅線 絶縁体: ポリエチレン 外径: $B=2.5\text{mm}$ 仕上り外径=シース外径 =7.2mm	中心導体: $d=1.0\text{mm}$ ϕ 銅線 絶縁体: ポリエチレン 外径: $D=2\times B=5.0\text{mm}$ 外部導体: 0.12mm ϕ 銅線編組(6本持24打) 仕上り外径=7.2mm
直流導体抵抗	1.0mm ϕ の軟銅線の 直流抵抗 $\approx 22\Omega/\text{km}$ ゆえにループ抵抗 $R_B \approx 44\Omega/\text{km}$	中心導体: 1.0mm ϕ 軟銅線の 直流抵抗 $\approx 22\Omega/\text{km}$ 外部導体: 編組の直流 抵抗 $\approx 15\Omega/\text{km}$ ゆえにループ抵抗 $R_C \approx 37\Omega/\text{km}$
	$R_C/R_B=37/44=0.841$	
静電容量	$C=(12.06\times\epsilon_e)/\log_{10}\frac{1.2\times B}{d}$ $d=1.0\text{mm}$ $B=2.5\text{mm}$ $\epsilon_e=2.3$ とすると $C_B \approx 58.2$ (pF/m)	$C=(24.16\times\epsilon_i)/\log_{10}\frac{D}{d}$ $d=1.0\text{mm}$ $D=5.0\text{mm}$ $\epsilon_i=2.3$ とすると $C_C \approx 79.5$ (pF/m)
	$C_C/C_B=79.5/58.2 \approx 1.37$	

〈第1表〉バランス型とアンバランス型の比較



〈第3図〉ケーブルの電氣的等価回路

ス型とアンバランス型に分類される。同様にオーディオ機器で取扱われる種々の信号も、バランス型とアンバランス型に分けることができる。カートリッジやマイクロホン等のコイルや圧電素子に発生する電圧は、電磁気学的にはひずみ波交流と称されるバランス型信号である。一方、CD等で利用されるパルス信号は、本来接地電位(0V)を基準に信号伝送をするので、アンバランス型信号といえる。

伝送される信号のタイプとケーブルのタイプとを合わせる方がベターなのはいうまでもない。パルス信号は、その立上がりおよび立下がりの部分に高周波成分を含むので、高周波用ケーブルを必要とする。この種の問題は次号以降で詳細に議論するとして、ここではアナログ信号を効率良く伝送する課題に着目してみたい。

減衰量： α

減衰量とは信号がケーブルを伝わっていく過程で消費されるエネルギー量の中で、小さい方がよい。ケーブルの等価回路は第3図のとおりで、減衰量はつぎの一般式で示される。

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)(G^2 + \omega^2 C^2)} + (RG - \omega^2 LC)}$$

ω : 角周波数 = $2\pi f$ f : 周波数

オーディオ周波数帯を数 10 kHz までとすればつぎの近似式になる。

(1) 商用周波数程度の低周波では、 $\omega^2 \approx 0$, $\omega C \gg G$, $\omega L \ll R$ なので

$$\alpha \approx \sqrt{R \cdot G} \quad G = \omega \cdot c \cdot \tan \delta$$

$$\approx \sqrt{R \cdot \omega \cdot c \cdot \tan \delta}$$

$\tan \delta$: 絶縁体の誘電正接

(2) 上限の数 10 kHz までは、 $\omega C \gg G$, $\omega L \ll R$, $LG \ll RC$ なので

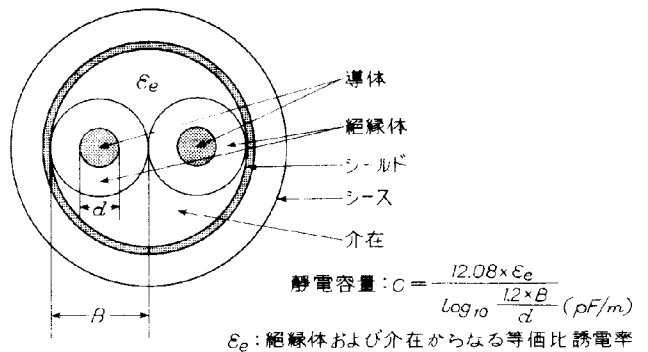
$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\omega CR}{2}} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{G}{\omega C} \right) \right\}$$

以上のことからオーディオ・ケーブルでは

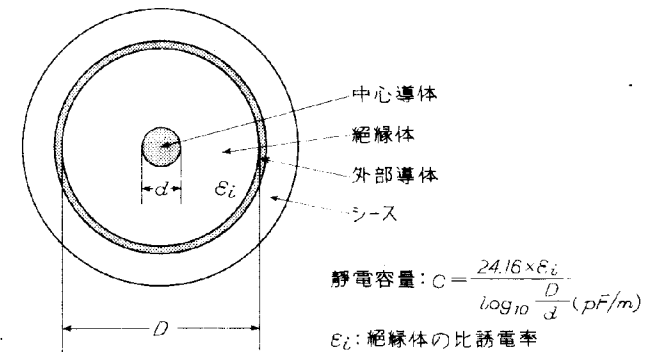
- ① 導体抵抗 (R) が小さいこと
 - ② 静電容量が小さいこと
 - ③ 絶縁体の電気特性 ($\tan \delta$) が良好なこと
- がロスの少ない条件である。

さて、本論に戻り、よく店頭で目にする太さ 7~8

mm 程度のオーディオ・ケーブルについて、バランス型(2芯シールド・タイプ)とアンバランス型(同軸タイプ)を同じ導体および絶縁材料で製造したものとし、比較してみよう。第4図、第5図にケーブル構造を、第1表に計算結果を示す。同軸ケーブルの外部導体の断面積は中心導体のそれより大となるため、導体抵抗は約 15% 同軸ケーブルの方が小さくなる。一方、静電容量は、約 37% 2芯シールド・ケーブルの方が小さくなる。この結果、同じ導体と絶縁材料を使用するとバランス型の方が減衰量を小さくすることができる。このことは、音の味付けに対する自由度がそれだけ与えられたことにほかならない。たとえば、第1表にあるバランス型ケーブルの導体径を見直し、アンバランス型と同一の静電容量になる約 80 μm とすると、導体径は約



▲<第4図>2芯シールドタイプ・バランス型ケーブル



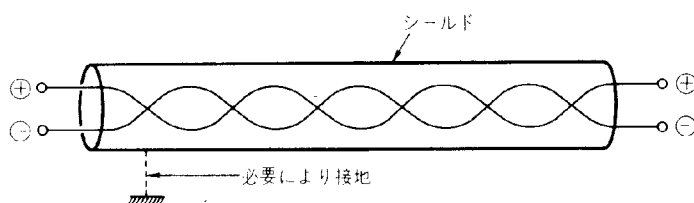
▲<第5図>同軸タイプ、アンバランス型ケーブル

1.35 mm と太くでき、このループ導体抵抗は約 25 Ω/km と大幅に低下して、低音域が改善(強調)された傾向のケーブルになる。

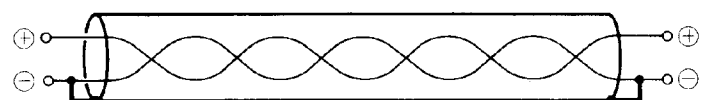
バランス型ケーブルの使い方

上記のとおりバランス型ケーブルの方が利点を有しても現実には同軸ケーブルが主流なのは、RCA ピンジャックが同軸構造にあるからであろう。

バランス型の通常の使い方は、2線芯に信号を供給し、シールドは外来ノイズの影響があるときのみ接地する(第6図)。バランス型ケーブルの端末でシールドを片側線芯と接続すると、アンバランス型にも使用できる(第7図)。このような使用法を推奨しているカタログ等も見かけるが、上記のとおり静電容量を増加させるのみで、バランス型の利点を殺した使用法といわざるをえない。(古河電気工業株)



<第6図>バランス型ケーブルの使用方法



<第7図>バランス型ケーブルをアンバランスとして使用



「燃線は表皮効果を減らせるか？」

バイワイヤリングについて

根岸邦夫

驚

異的なスピーカー・コード登場、高音域用には細い銅線を多数、低音域用には太い銅線、独特な方法で撚り合わせました……。最近この種の謳い文句をよく目にするが、こうも都合良く、高音域の信号が細い銅線に、低音域の信号が太い銅線にと分離して流れるものだろうか？ われわれが物理学や電磁気学で学んだ理論によると、複数の導通路があれば、直流や低周波電流は、それぞれの導体抵抗に反比例して流れることになっている。すなわち、低周波域の信号は、細い線にも太い線にもそれぞれの太さに応じて流れるという考え方だ。しかし、高音域については、細い線が導体の外側にくるように配列すると、表皮効果で細い線に集中して電流が流れる、との反論が出るだろう。たしかに物の本には、表皮効果の軽減策として細い線を何本も撚り合わせた燃線が効果的と書かれている。そこで、表皮効果がどの程度の周波数から問題となり、燃線の効果がどの程度かについて、以下で議論してみよう。

表皮効果とは何か？

導体を流れる電流は、周波数が上がるにつれ導体の表面に集まろうとする性質がある。これは高周波の電磁波は金属中に深く入り込めないと、導体内部の電流の反作用として、理由が説明されている。詳しくは電磁気学や有線伝送理論の書物を参考にされたい。問題は、電流が導体表面に集まるために導体の中心部には電流が流れず、結果として導体の有効断面積が小さくなり導体抵抗が増加することにある。導

体抵抗が増加すれば、前月号で示したように減衰量が大きくなり、音質劣化をひきおこすようになる。

ここで、表皮効果がどの程度の周波数から問題になるのかを考えてみよう。電流密度が導体表面に対し $1/e$ (e は自然対数の底, $e=2.718\dots$) になるところの深さを“表皮深さ: δ ”と称して表皮効果の日安にしている。ちなみに $1/e$ は約 0.37 で、 δ の深さでの電流密度は、表面に対して 37% ということになる。

δ は次の関係式で示される。

$$\delta = \sqrt{2 / (\omega \sigma \mu_0 \mu)}$$

ω : 角周波数 = $2\pi f$

σ : 導電率

μ_0 : 真空の透磁率

μ : 導体の比透磁率

導体が銅線の場合は次の式となる。

$$\delta_{Cu} = 2.09 / \sqrt{f} \text{ (mm)}$$

f = 周波数 (kHz)

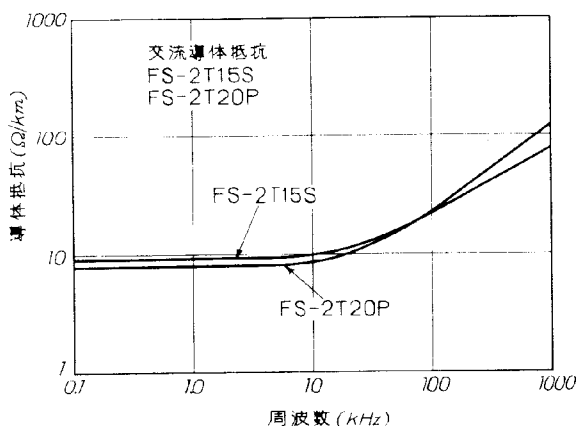
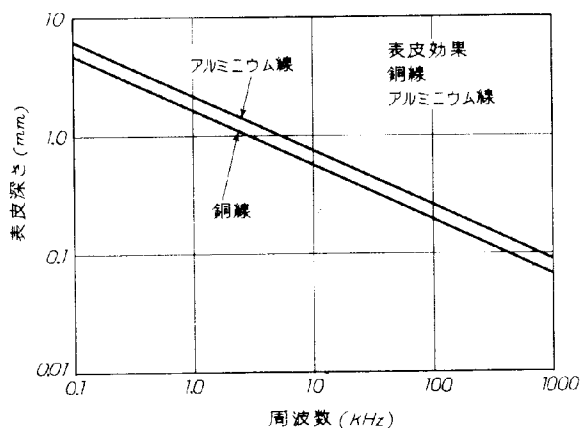
一般に、導体径: d と δ の関係が

$$d \geq 2\delta$$

を満足する周波数では表皮効果を考慮しなければならない。第1図に表皮深さと周波数の関係を示す。一般のスピーカー・コードでは、 $d=2\delta$ が成立するのは 10~20 kHz 程度であり、高音域

〈第1図〉▷

導体中を伝わる信号の周波数と表皮深さの関係。オーディオ用として使われる通常の線径では、10 kHz 以上のあたりから影響が出る。また、導体材料によって表皮効果の度合いに違いがあり、銅よりもアルミニウムのほうが、導電率が低いために表皮効果の影響を受けにくい。



◁ 〈第2図〉

FS-2 T 20 P (燃線型) と FS-2 T 15 S (単線型) の導体抵抗比較。一般的な予想に反して、FS-2 T 15 S のほうが、周波数に対して少ない抵抗値変化に収まっている。燃線構造に表皮効果面の大きなメリットを求めるのは、適切といえない。

の上のほうで影響が出る。

表皮効果の軽減策

表皮効果の軽減には細径の素線を数多く撚り合わせた撚線が良いとされ、実際にこのようなスピーカ・コードが市販されている。さらにバイワイヤリング用として、低音用と高音用を分離したものである。

では、撚線の効果がどの程度なのかを調べてみよう。比較にちょうど適したスピーカ・コードがあるので実験を試みた。古河電工から販売されているFS-2 T 15 SとFS-2 T 20 Pだ。これからコードの構造と材質を第1表に示す。FS-2 T 15 Sは、導体に1.5 mmφ PC OCC[®]アズキャストの単線を使用している。一方、FS-2 T 20 Pは、0.18 mmのPC OCC[®]を80本撚り合わせた撚線導体を使用、導体外径は1.86 mmである。導体断面積はともに約2 mm²で、ポリプロピレンの薄肉絶縁を施している。コードは、構造・材質とも非常に類似しており、導体の撚線と単線の効果を比較するのに適している。以下、FS-2 T 15 Sを単線型、FS-2 T 20 Pを撚線型と表記して、話を進めよう。

まずはじめに、これらコードの導体抵抗に対する周波数特性（交流導体抵抗）の評価結果を第2図に示す。なんと交流導体抵抗の周波数に対する増加割合は、撚線型のほうが大きいのである。とくに表皮の深さが撚線導体の素線径0.18 mmとほぼ等しくなる100 kHz以上では、上昇カーブの傾きはさらに急激となる。次の計算をしてみるとこの原因が理解できる。実験に使用した撚線型は、撚線導体の最外層に

項 目		FS-2T20P (撚線型)	FS-2T15S (単線型)
導 体	材 質	PC OCC	PC OCC アズキャスト
	構 成 (本/mm)	80/0.18	1/1.50
	外 径 (mm)	1.86	1.50
	断 面 積 (mm ²)	2.04	1.77
	最大抵抗 (Ω/km)	10	10
絶縁体	材 質	ポリプロピレン	ポリプロピレン
	外 径 (mm)	2.5	2.1
シース	材 質	柔軟性PVC	柔軟性PVC
仕上がり外径 (mm)		6.5	5.8

〈第1表〉 FS-2 T 20 P, FS-2 T 15 S スピーカ・コードの規格

0.18 mmのPC OCC[®]素線を28本撚り合わせている(第3図)。この最外層の断面積は0.718 mm²である。一方、単線型の導体は1.5 mmφの単線であるが、外表面より内側0.18 mm(第3図の破線)までの面積: S' は0.746 mm²で、撚線型の外層より S' が大になり、交流導体抵抗が小さいのも道理である。すなわち、導体を単に撚線構成としても効果はなく、むしろ単線の方が占積率が良くケーブルを細径化できるメリットがある。バイワイヤリング用と称し、高音域用に低音域用より細い撚線を使用したコードは、表皮効果から見ると十分な性能を発揮するとは言い難い。

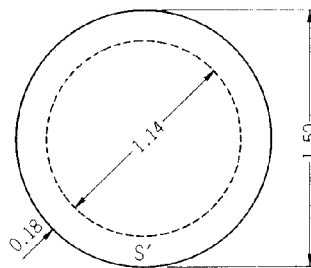
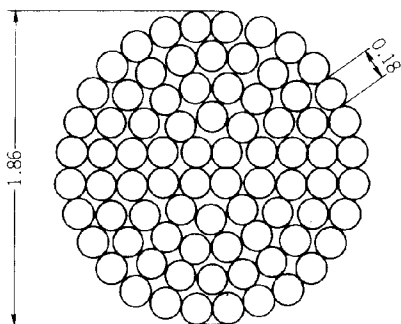
では、どのようにしたら表皮効果による交流導体抵抗の上昇を抑えることができるのか？ そのひとつの方法は、外径の太い同筒形導体を作ることである(第4図)。たとえば、中心に絶縁性の介在物を入れ、その上に所定の銅線を1層または2層にして撚り合わせれば、交流導体抵抗はもっとフラットな特性となるだろう。しかし、ここで使用した撚線型と同様の2 mm²の導体

では、2層構造でも外径が約2.7 mmとなり、単線型の径の約2倍にもなってしまふ。

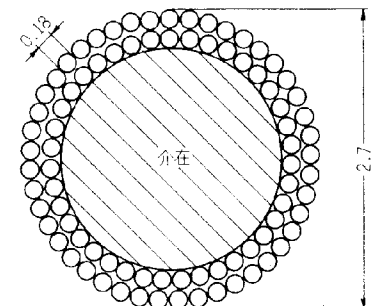
話は変わるが、NTTの電話用ケーブルの導体が単線である理由のひとつに、撚線による表皮効果低減よりも単線による占積率の良さを考慮したことが挙げられる。同様に、スピーカ・コードに単線導体を使用すると、コードのフレキシビリティはなくなるが、一部の市販品のように、細径でありながら低音と高音のバランスが良いものを作ることもできる。いずれにしても、バイワイヤリングで高音域の充実を目的とするならば、細い撚線は効果がなく導体径の太いものを選択すべきであることを、十分御承知おきいただきたい。(古河電気工業株)

× ×

ケーブルに使用される導体材料や絶縁材料は、次から次へと新素材が出現し、ウツカリすると基本的特徴を理解しないまま、音の流行を追うだけのパターンに陥ってはいないでしょうか。今回は注目の、ケーブル素材にまつわってお話の予定です。(編)



◁
〈第3図〉
FS-2 T 20 P
の撚線導体と
FS-2 T 15 S
の単線導体を
比較する



〈第4図〉 表皮効果の対策例



信号伝送に影響する特性は何か？ 絶縁材料の選択について

根岸邦夫

オーディオ用ケーブルの音質差について議論されるとき、導体材質がその代表として取沙汰されることが多い。たとえば“PCOCCの音はこんな音”といったぐあいである。しかしケーブルの音質を決定するのは次の3つの要素だが、このことを理解したうえでこのような表現がされているとは思えない。3つの要素とは、

- ①導体の材質
- ②絶縁体の材質
- ③ケーブル構造

である。これら3要素が複雑にからみあって音質が決まるのであり、簡単に“PCOCCの音”を識別することはできないのである。真に導体材質の差を知りたいければ②③をまったく同じにして比較しなければならぬ。しかし市販されているケーブルにこのようなものはなく、もしもケーブルを換えたとき音が変わったのなら、この3要素のどこが支配的であったのかを考察する必要がある。このようなアプローチをしていけば、自分の好みのケーブルを容易に選択できるようになるだろう。

筆者の経験では導体材質による改善は主として分解能に表われ、音色に関する部分は絶縁材およびケーブル構造が支配的である。今月は②の絶縁材質について考察してみたい。

絶縁材の種類

現在、電子機器用電線、ケーブルに多く使用されている絶縁材の種類と一般特性を第1表に示す。PVC(ポリ塩化ビニール)とPE(ポリエチレン)は安価なため、最も多く使用されている材料である。PVCは主として低電圧用(600V以下)の電力ケーブルに使用される。通称Fケーブル(正式にはVVF)は屋内の電力供給用に使用されるがこれもPVC絶縁である。スピー

カ用ケーブルにPVC材料を使用するのはこの低電圧用ケーブルの流れとも考えられる。PEは、良好な電気特性を生かして電話用などの通信用ケーブルや高電圧用の電力ケーブルに絶縁用として使用されている。

電子機器内配線には、PVCやPEに電子線照射として耐熱性を上げたビーマックス®等の架橋電線が、半田ゴテが触れても溶融しない特徴を生かして多く使用されている。この他に特殊用としてテフロン®, ポリプロピレンなどが使用される。現在、電子機器用にゴム絶縁電線を使用するのは皆無と言ってよい。スピーカ・ケーブルなどの外被(シース)にゴム状の柔軟性樹脂が使用されていることがあるが、ほぼ100%、柔軟性PVCである。

電気的特性

第1表の電気的特性には、ケーブルを設計する上で重要な4つの特性が記されている。体積固有抵抗は直流に対

する単位体積あたりの抵抗で、絶縁性能を示している。絶縁耐力は1mm厚の材料に電圧を加えていったとき絶縁破壊する電圧のことである。体積固有抵抗、絶縁耐力ともに電力用ケーブルにとって重要な特性であるが、信号伝送用のケーブルでは比誘電率と誘電正接が重要になる。誘電正接(tan δ)は交流電界が絶縁体に加わったときの損失量のめやすになる。絶縁体に電界が加わると内部に分極が発生するが、交流の場合は分極するのに必要な電流が流れるため、この電流による損失(誘電体損)が発生する。本連載1回目('89年7月号)の「ケーブルの電氣的等価回路」で漏えい量: Gが

$$G = \omega \cdot C \cdot \tan \delta$$

で示されると記したが、Gは絶縁体中を流れる漏れ電流であるので、誘電正接の小さな絶縁体を選定するのが好ましい。では、次に信号伝送用ケーブルにとって最も重要な特性である比誘電率について考えてみよう。

特性	材料名	高密度ポリ	低密度ポリ	難燃性ポリ	架橋ポリ	ポリ塩化	架橋PVC	ポリプロ	テフロン®			テフゼル®	ブチル	硅素
		エチレン (HDPE)	エチレン (LDPE)	エチレン (NFPE)	エチレン (XLPE)	ビニール (PVC)	(XL PVC)	ピレン (PP)	FEP	PFA	TFE	(ETFE)	ゴム	ゴム
電気的性質	体積固有抵抗 (Ω・cm 20℃)	>10 ¹⁷	>10 ¹⁷	>10 ¹⁵	>10 ¹⁷	10 ¹² ~10 ¹⁵	10 ¹² ~10 ¹⁵	6.5×10 ¹⁴	>10 ¹⁸	>10 ¹⁸	>10 ¹⁸	>10 ¹⁶	10 ¹⁵	10 ¹⁴ ~10 ¹⁵
	比誘電率 (50~10 ⁶ Hz)	2.3	2.3	2.4~2.7	2.3	8~4	8~4	2.25	2.1	2.1	2.1	2.6	4~3	5~3
	絶縁耐力 (kV/mm)	30~50	30~50	20~40	30~50	20~30	20~30	30~50	20~25	20~40	20	16	20~40	20~30
	誘電正接 (50~10 ⁶ Hz%)	0.02~0.05	0.02~0.05	0.2~1.0	0.02~0.05	8~15	6~12	0.02~0.06 (10 ⁶ Hz)	0.02~0.07	0.03	0.02	0.06~0.5	0.5~3	2~4
機械的性質	引張強度 (kg/mm ²)	2.0~3.5	1.0~2.0	1.0~2.0	1.0~2.5	1.0~2.5	1.2~2.5	3.0~4.0	1.9~2.2	2.8	1.4~3.5	3.5~5.0	0.5~0.7	0.4~1.0
	伸び (%)	100~400	300~750	300~600	300~500	100~350	150~250	250~700	250~330	280~300	200~400	100~400	300~600	200~400
	可撓性	良	優	優	優	優	優	良	優	優	優	優	優	優
耐カトスルー性	優	優	優	優	可	良	優	優	優	優	優	優	優	
物理的性質	比重(20℃)	0.94~0.96	0.92~0.93	0.95~1.2	0.92~0.96	1.2~1.5	1.3~1.5	0.9~1.0	2.1~2.2	2.1~2.2	2.1~2.2	1.7	1.3~1.4	1.1~1.3
	融点(℃)	135~140	112~120	110~115	—	軟化点 約130	—	155~160	275	302~310	327	270	—	—
	耐熱温度 (連続使用℃)	85	75	80	~125	60	105	90	200	260	260	150	80	180
最低使用温度 (℃)	<-60	<60	-30~ ~-50	<-60	-15~ ~-40	-15~ ~-30	-5~ ~-45	<-80	<-80	<-80	<-100	-40	-60	

〈第1表〉主な絶縁材料と一般特性(古河電工/電子・電気機器用電線要覧から)

