

直流信号を伝送するためには、電流が往復する2本の導線が必要です。交流信号の伝送も基本的には同じで、2本の導線が必要です(図1)。しかし、周波数が高くなると、導線の浮遊インダクタンスや浮遊キャパシタンスの影響で負荷にかかる電圧と電流の位相がずれてきます。

図2において、信号源の内部抵抗 r および負荷抵抗 R に対して、伝送路の浮遊インダクタンス L_0 と浮遊キャパシタンス C_0 をある割合にすると、ケーブル長にかかわらず負荷 R の点での位相ずれがなくなります。具体的には式(1)の条件のときです。

$$\left. \begin{aligned} Z [\Omega] &= \frac{L_0}{C_0} \\ r = R = Z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

L_0 : 単位長当たりのインダクタンス [H]
 C_0 : 単位長当たりのキャパシタンス [F]

この Z を伝送路の特性インピーダンスといい、 $r = R = Z$ にすることを「インピーダンスのマッチングを取る」と表現します。

同軸ケーブルの基礎と選び方

高周波信号の伝送には平衡ケーブルや導波管を使うこともあります。損失が少ない、漏洩が少ない、インピーダンスが一定、適度に曲げやすい、接続/切り離しが容易、直流電力を重畳できる、など多くの特長をもつ同軸ケーブルが最もよく使われます。

■ 基礎知識

● 構造とインピーダンス

同軸ケーブルは、図3のように内部導体と外部導体を絶縁物(誘電体)を挟んで同軸上に配置した構造になっています。特性インピーダンス Z_0 [Ω]は、外部導体内径と内部導体外径の比、および誘電体の比誘電

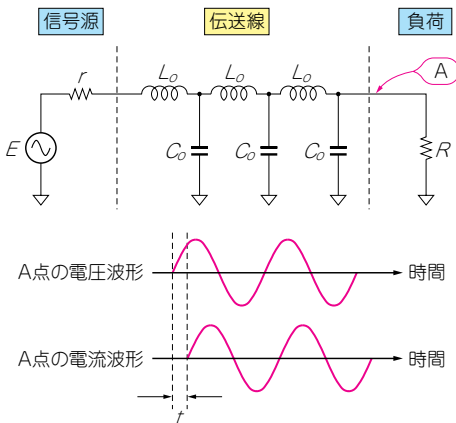


図2 高周波信号の伝送線路における位相のずれ

率で式(2)のように決まります。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \log_e \frac{D}{d} = \frac{138.1}{\sqrt{\epsilon}} \log \frac{D}{d} \dots\dots\dots (2)$$

ϵ : 誘電体の比誘電率

D : 外部導体の内径 [m]

d : 内部導体の外径 [m]

ケーブル外径が一定(外部導体の内径が一定)であれば、内部導体の外径を太くすれば特性インピーダンスが低くなり、細くすれば高くなります。また、絶縁物の比誘電率が高いと特性インピーダンスが低くなります(比誘電率の平方根に反比例)。そのため、自由に特性インピーダンスを選ぶことができます。

実際には、極端に細い内部導体や極端に薄い誘電体は製造困難ですので、数Ω~数百Ωの範囲に限られます。しかし、実際に使われる同軸ケーブルの特性インピーダンスは、ほとんどが50Ωあるいは75Ωになっています。もちろん、同軸ケーブルを接続するコネクタの特性インピーダンスも50Ωあるいは75Ωになっています。

50Ωあるいは75Ωになっているのには理由があります。簡単にいうと、同軸ケーブルの損失が最小になる外部導体内径 D と内部導体外径 d の比は一義的に決まり($D/d = 0.2785$)、空気を絶縁物にしたときには約75Ω、ポリエチレンを絶縁物にしたときは約50Ωになるからです[詳細は参考文献(6)を参照]。

以前は絶縁物に空気を使っていたので75Ωが主流でしたが、ポリエチレンの発明以降はほとんどの同軸ケーブルの絶縁物はポリエチレンになり、50Ωが主流になりました。それに合わせて、多くの高周波用測定器の入出力インピーダンスも50Ωになっています。

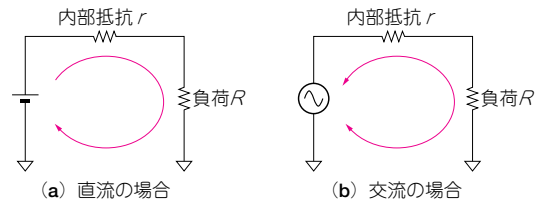


図1 電力の伝送

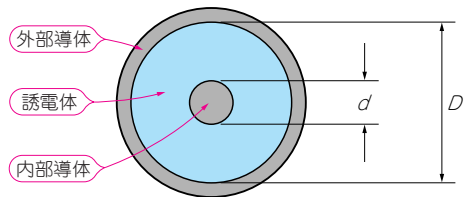


図3 同軸ケーブルの断面構造

● 構造と限界周波数の関係

電磁的に見ると、同軸ケーブルの内部では図4のように直交する電界と磁界が相互に影響しながら進んでいます。このような伝搬形態をTEM (Transverse Electro Magnetic) モードといい、これは導波管内の伝送モードと同じです。

同軸ケーブルが太くなると外部導体と内部導体の間隔が波長に対して大きくなり、電界が到達しないうちに極性が変わってしまいます。これはTEMモード以外の伝搬形態となり、伝搬特性が変わってしまいます。具体的には、特性インピーダンスが変わったり損失が増えたりします。この周波数を同軸ケーブルの限界(または遮断)周波数といい、同軸ケーブルはこの限界周波数以下で使用しなければなりません。

限界周波数 f_c は式(3)で計算できます。

$$f_c [\text{Hz}] = \frac{c}{\pi \sqrt{\epsilon} \frac{D+d}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

c : 光速 (3×10^8 m/s)

ϵ : 誘電体の比誘電率

D : 外部導体の内径 [mm]

d : 内部導体の外径 [mm]

同軸ケーブルが太くなると限界周波数が下がり、比誘電率が小さくなると限界周波数が上がります。例えば、10D-2Vの外部導体内径は9.7 mm、内部導体外径は2.9 mmで比誘電率は約2.26ですから、限界周波数は約10 GHzとなります。表1に主な同軸ケーブルについての限界周波数を示します。

● 内部の電波の速度は真空中より遅く波長が短くなる

誘電体の中を通る電磁波(電波)の速度は、真空中の速度(約 3×10^8 m/s)に比べて遅くなります。速度の低下は比誘電率の平方根に反比例し、比誘電率が高く

なると速度は遅くなります。

同軸ケーブルでは、誘電体の中を電波として伝搬するので、同じように伝搬速度が低下します。例えば、ポリエチレン(比誘電率2.26)充填の同軸ケーブルの場合は、約66%になります。速度が遅くても周波数は変わりませんので、波長は比誘電率の平方根に反比例して短くなります。このため速度の低下率は短縮率と呼ばれます。

● 同軸ケーブルの構造

▶ 外部導体

外部導体としては、導電率が高い継ぎ目のない金属管が望ましいのですが、ケーブルが太くなると金属管では曲げにくくなってしまいます。そのため、一般用の同軸ケーブルでは、図5に示すように外部導体に網組み銅線を使用しています。

網組み銅線は金属管に比べて漏洩特性が劣化するので、網組み銅線を2重にしたり、誘電体の上にアルミ箔あるいは銅箔を巻いてから網組み銅線をかぶせて漏洩特性の向上を図ったものもあります。超高周波帯用同軸ケーブルは、限界周波数の制限から細いケーブルになるので、銅管を使うことが多くなります。金属管外部導体は図6のような構造で、網組み外部導体に比べて曲げにくいことからセミリジッド・ケーブル(semi-rigid cable)と呼ばれます。

表1 同軸ケーブルの種類と限界周波数

種類	外部導体内径 [mm]	内部導体外径 [mm]	比誘電率	限界周波数 [GHz]
1.5D-6CT	1.7	0.51	2.1	59.6
3D-FB	3	1.07	1.52	38.1
10D-2V	9.7	2.9	2.26	10
AF50-10	30	10.7	1.52	3.8

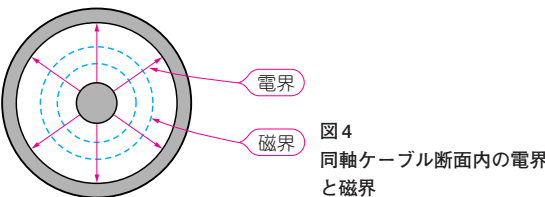


図4 同軸ケーブル断面内の電界と磁界

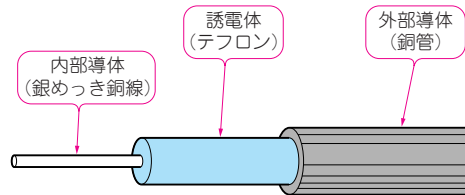
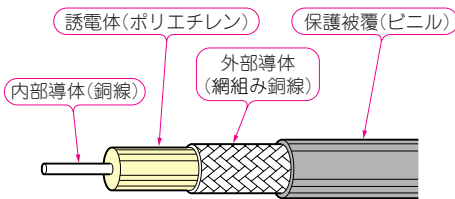
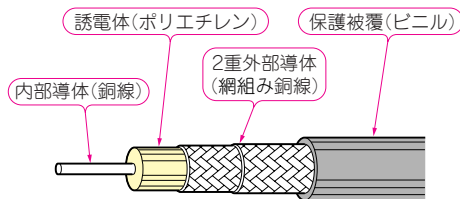


図6 セミリジッド同軸ケーブルの構造



(a) 1重網組み(□D-2Vタイプ)



(b) 2重網組み(□D-2Wタイプ)

図5 一般用同軸ケーブルの構造