



実は知らない・解っていない——  
高周波の振る舞い

## 高周波回路のお話 パート2：インピーダンス・マッチングと 電波防護指針

藤田 昇  
Noboru Fujita

今回はパート1に引き続きインピーダンス・マッチングからお話を始めましょう。

### 4 インピーダンス・マッチング

#### 4.1 最大電力を得るには

図19を見てください。電気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。これは直流も交流も同じです。内部抵抗 $r$ の信号源から最大電力を取り出すためには、負荷抵抗 $R$ の値を $R=r$ にする必要があります。なお、伝送線の抵抗は内部抵抗や負荷抵抗に比べて十分低いものとして無視しています。

#### 4.2 特性インピーダンス

周波数が高くなると伝送線の寄生リアクタンスの影響で、図20のように負荷にかかる電圧と電流の位相がずれてきます。

一般に伝送線路の寄生リアクタンスは極めて小さな値なので、オーディオ周波数などの低い周波数帯では位相のずれもごくわずかです。しかし、周波数が高くなる(波長が短くなる)と相対的にずれが大きくなってしまいます。同じ周波数であればケーブル(伝送路)が長くなると位相のずれが大きくなります。位相がずれると、負荷 $R$ で消費される実効電力は、単純な電圧と電流の積より小さくなってしまいます。

電圧を $E$ V、電流を $I$ A、電流と電圧の位相差を $\theta$

とすれば、実効電力 $P_e$ Wは、

$$P_e = VI \cos \theta \dots\dots\dots (4)$$

となります。位相が $90^\circ$ ずれると負荷にはまったく電力を供給できなくなります。

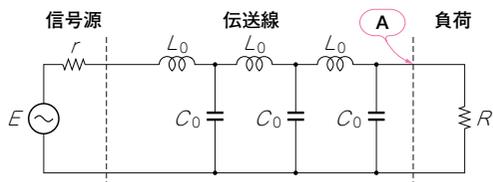
ここで、内部抵抗 $r$ および負荷抵抗 $R$ に対して伝送路の寄生インダクタンスと寄生キャパシタンスをある割合にすると、伝送線路長に係わらず負荷 $R$ の点で位相ずれがなくなります。具体的には以下の条件のときです。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \text{ [}\Omega\text{]} \dots\dots\dots (5)$$

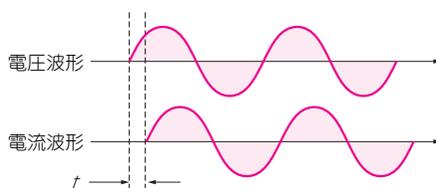
$$r = R = Z_0$$

この $Z_0$ を伝送路の「特性インピーダンス」といいます。そして、信号源インピーダンス $r$ と負荷インピーダンス $R$ と伝送路の特性インピーダンス $Z$ を等しくすることを「インピーダンス・マッチングを取る」などと表現します。

インピーダンス・マッチングが取れば、効率よく高周波電力を伝送できます。いいかえると「高周波とはインピーダンス・マッチングを考慮しないと電力を効率よく伝送できない周波数」ということになります。

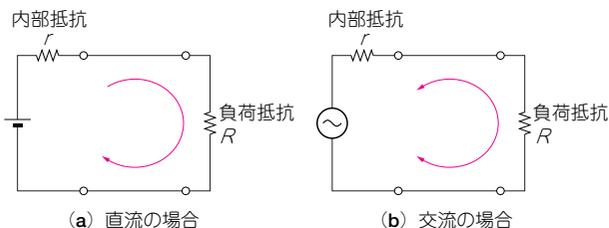


(a) 等価回路



(b) A点の波形

<図20> 高周波電力伝送の等価回路



<図19> 電力伝送の等価回路

### 4.3 同軸ケーブルの特性インピーダンス

高周波信号伝送によく使われる同軸ケーブルは図21のように、内部導体と外部導体の間に絶縁物(誘電体)を挟んで同軸上に配置した構造になっています。その特性インピーダンスは、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率によって、式(6)のように決まります。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} = \frac{138.1}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{D}{d} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $\epsilon_r$ ：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(外部導体内径が一定)であれば、内部導体の外径を太くするほど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逆比例)。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。

#### ● 同軸ケーブルのインピーダンスが50Ωや75Ωになったわけ

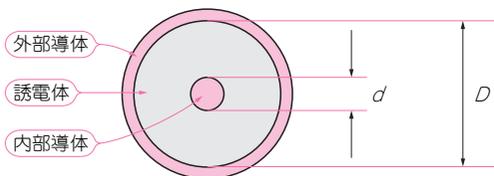
市販の同軸ケーブルの特性インピーダンスは、50Ωまたは75Ωがほとんどです。これは、導体抵抗による損失が最小になる外部導体内径と内部導体外径の比が決まっており、空気を絶縁物にした場合は75Ω、ポリエチレンを絶縁物にした場合は50Ωになるからです。ポリエチレン発明以前は空気絶縁のものが多く、75Ωの同軸ケーブルが使われました。

高周波特性がよいポリエチレンが発明されると、ほとんどの同軸ケーブルはそれを利用するようになりました。そのため、50Ωの同軸ケーブルが多用されるようになったのですが、ポリエチレン発明以前から存在するシステム(HF帯以下の無線機やテレビジョン・システム)では、今でも75Ωの同軸ケーブルが使われています。

#### ● マイクロストリップ・ラインの特性インピーダンス

同軸ケーブル以外でも、線路の形状がわかれば特性インピーダンスを算出できます。

よく使われるマイクロストリップ・ラインの特性インピーダンスは「マイクロウェーブ技術入門講座基礎編」や「GHz時代の高周波回路設計」(いずれもCQ



$d$ ：中心導体の外径、 $D$ ：外部導体内径

〈図21〉一般的な同軸ケーブルの構造

出版社)を参照してください。表3は特性インピーダンス50Ωのマイクロストリップ・ラインのプリント基板上の導体幅を計算したものです。

最近では高周波回路にも多層基板を使うことが多く(デジタル回路と共存させるため)、誘電体の厚さが薄くなり、導体幅も狭くなってしまいます。極端に細いパターンを精度よく作るのは困難なので、グラウンド面を1層離れた面に設けることがあります。

### 4.4 反射波と定在波

信号源、伝送線、負荷のインピーダンス・マッチングが取れていないときの電力はどこに行くのでしょうか？ 実は、負荷抵抗で消費しなかった分は「反射波」として信号源に戻っていきます。そして信号源の内部抵抗で電力を消費しますが、ここでも反射されるので、さらに負荷側に反射波として戻ります。

さて、負荷からの反射電力(反射波)があると、信号源からの信号(進行波)と干渉して、弱め合ったり強め合ったりします。2本の導線間の電圧を測定すると、負荷端までの距離と波長の関係によって、図22のように電圧の高い部分と低い部分が観測できます。高周波信号としては変化しているのですが、電圧の高低部分は固定しているように見えますので、これを「定在波」といいます。

### 4.5 VSWRとSWR

図22において最高電圧 $V_H$ と最低電圧 $V_L$ の比( $V_H \div V_L$ )をVSWR(Voltage Standing Wave Ratio：電圧定在波比)といいます。

VSWRは反射電力の大小を、延いては負荷に供給する電力(進行電力)の割合を表すので、高周波機器のインピーダンス・マッチングの善し悪しを示すパラメータとしてよく使われています。

かつては給電線(送受信機とアンテナを接続する線)

〈表3〉特性インピーダンス50Ωのマイクロストリップ・ラインの幅

誘電体厚さ [mm]	ガラス・エポキシ ( $\epsilon_r = 4.8$ ) [mm]	テフロン ( $\epsilon_r = 2.3$ ) [mm]
1.6	2.8	4.4
1.2	2.11	3.5
0.8	1.4	2.34
0.4	0.7	1.16
0.2	0.34	0.57
0.1	0.16	0.28

備考 ▶

- (1) アイラボラトリーのウェブ・サイトで計算 (<http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool.htm>)
- (2) 導体厚さ 18  $\mu\text{m}$ 、周波数 2.4 GHz.