

高速デジタル・データ伝送入門

第3回 伝送線路で起こる反射のメカニズム

志田 晟
Akira Shida

■ はじめに

前回は、信号が線路を伝わるメカニズムや速度などについて説明しました。線路の終端を適切に処理すると、信号が終端で吸収され、終端からは何も戻ってこないことも説明しました。

高周波アナログ回路では、終端で信号エネルギーを吸収させて、何も戻ってこないようにするのが普通です。しかし、**これまでのデジタル回路の多くは、終端で吸収する形をとってきていません。**

吸収されなかったエネルギーは終端で反射し、線路を戻ります。高速デジタル信号では、この**反射が誤動作の一因になってきます。**

そこで今回は、線路の終端や途中で信号が反射する現象について、詳しく解説していきます。

伝送線路の特性インピーダンス

● 特性インピーダンスは伝送線路の特性を表すパラメータ

同軸ケーブルはテレビのアンテナ線などによく使われているので、「75 Ωの同軸ケーブル」とか「50 Ωの同軸ケーブル」といった呼び方を聞いたことがあると思います。しかし、同軸ケーブルの芯線と周囲の網線の間にテストを接続して抵抗値を測定しても、テストの示す値は∞です。また、芯線と周囲の網線の両端の抵抗値を測定してみてもほぼ0 Ωで、50 Ωや75 Ωといった値は示しません。

この50 Ωや75 Ωといった値は、**特性インピーダンス**というもので、**伝送線路の特性を表すパラメータ**です。

● 空間インピーダンス

連載第2回(2003年5月号)では、伝送線路を伝わる信号の速度は、線路自体の金属材質などでなく、線路周囲の誘電率でほぼ決まると説明しました。つまり信号は電磁的に変化する現象が元になって、マクスウェルの方程式で示される形で次々に伝わります。このよ

うに変化する電磁エネルギーは、線路がない空間も進みます。

平面的な電磁波が空間を進むときの電界 E と磁界 H の比 η は一定となり、その次元はインピーダンスと同じで式(3-1)のように表されます。これを空間インピーダンスといいます。真空中の η は376.730 Ωとなります⁽⁴⁾。

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \dots\dots\dots (3-1)$$

ただし、 η : 空間インピーダンス [Ω], μ : 透磁率, ϵ : 誘電率

● 線路の空間インピーダンスが特性インピーダンス

信号が伝送線路を伝わる場合も、**線路に沿った空間を電界と磁界が相互に作用し合って進みます。**線路の空間インピーダンスは自由空間と同様に、線路に沿った(はさまれた)空間の電界と磁界の比で決まります。これが線路の特性インピーダンスと呼ばれるものです。**電磁的な特性なので、テストでDC的に測る抵抗とは無関係な値です。**

伝送線路の場合、金属の線路にはさまれた空間の電界は線路に影響され、自由空間とは異なった値になります。平行板でできた線路を考えてみます。単位長さ当たりの容量 C は、以下の式で表されます。

$$C = \epsilon \frac{w}{d} \dots\dots\dots (3-2)$$

ただし、 C : 単位長さ当たりの容量 [F/m], w : 線路の幅 [m], d : 線路の間隔 [m]

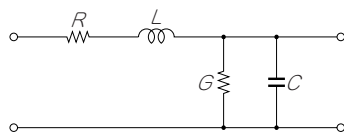
一方、導体表面を流れる電流密度は、導体表面にできる磁界の大きさに等しく、単位長さ当たりを通過する磁束 ϕ は次式⁽⁴⁾で表されます。

$$\phi = \mu \frac{d}{w} I \dots\dots\dots (3-3)$$

インダクタンス L は、電流を流したときにどの程度磁束が発生するかという比例定数ですから、以下の関係が成り立ちます。

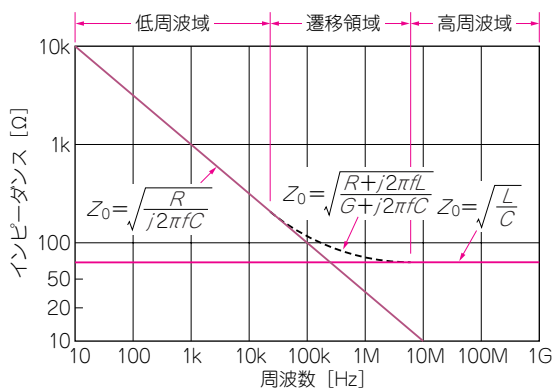
$$L = \frac{\phi}{I} = \mu \frac{d}{w} \dots\dots\dots (3-4)$$

〈図3-1〉伝送線の等価回路



R : 抵抗 [Ω/m]
 L : インダクタンス [H/m]
 G : コンダクタンス [$1/(\Omega\text{m})$]
 C : キャパシタンス [F/m]

〈図3-2〉⁽⁴⁾特性インピーダンスと周波数の関係



● 伝送線の特性インピーダンスは等価回路で考える
 マクスウェルの方程式を伝送線路の場合に適用して計算することは大変です。そこで線路の特性インピーダンスは、図3-1の等価回路で表される微小領域が繋がっているものとして計算します。この等価回路を使って特性インピーダンスを表すと、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{G + j2\pi fC}} \quad \dots\dots\dots (3-5)$$

となります。

数MHz～数百MHz付近では R と G を無視できるので、この帯域で伝送線路を扱うときは、

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \dots\dots\dots (3-6)$$

という簡単な式で表します。また、この周波数領域では L と C の値がほぼ一定なので、特性インピーダンスも一定となります。 L と C の比が同じであれば、特性インピーダンスは一定となるので、写真3-1に示すように大きさが異なっても、同じ特性インピーダンスのケーブルを作ることができます。絶縁材の誘電率が同じであれば、内側導体の外形と外側導体の内径の比を保てば、同じ特性インピーダンスになります。

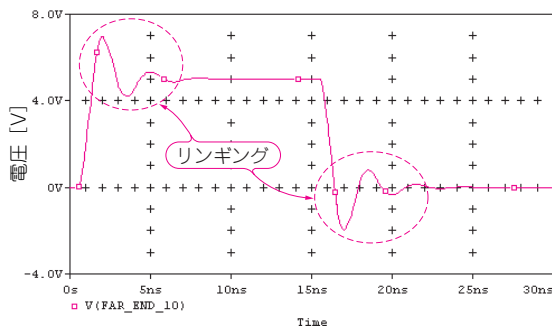
プリント基板でも同じように、**ベタ層とプリント・パターンの距離、そしてパターンの幅の比を同じにすれば、同じ特性インピーダンスになります。**

一方、数MHz以下の周波数では周波数が低くなるにつれて、式(3-7)に示すように特性インピーダンス



〈写真3-1〉同軸ケーブル(どちらも50Ω)

〈図3-3〉一般的なデジタル波形(受信側)



は高くなります。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{j2\pi fC}} \quad \dots\dots\dots (3-7)$$

図3-2に式(3-6)と式(3-7)の領域を示します。

なお、図3-2で数MHz～1GHzではインピーダンスは一定となっていますが、数百MHz帯では線路の抵抗ぶんによるロスが問題となり、数GHz帯では誘電体の損失が問題となります。

SPICEによるデジタル信号伝送のシミュレーション

■ 一般的なデジタル回路ではリンギングが発生する

図3-3は一般的なデジタル回路で、HレベルとLレベルのパルス幅が1:1の方形波を送ったときの、受信側の波形をシミュレーションしたものです。**立ち上がり/立ち下がり**で部分で、**リンギング**が発生していることがわかります。

図3-3のようなリンギングで収まっていれば誤動作は起こりませんが、実際のプリント基板上に実装した回路では、いろいろな要素が入り込みます。さらに高速な信号を扱っていくには、このようなリンギング

