

## 第1章 デジタル信号の高速化と電子回路実装設計

近年の電子回路で扱う信号の高速化には目覚ましいものがあります。当然ですが、扱う信号が高速になればなるほど、その電子回路が単位時間あたりに処理する能力が高くなります。信号の高速化は当面、留まることはなさそうです。

一方、信号が高速化されればされるほど、電子回路実装設計に携わる技術者の肩には、重い負担がかかるようになりました。一昔前の低速の信号であれば、基本的に配線さえすれば、電子回路は問題なく動作しました。電子回路の実装設計は、単なる配置、結線作業で、特に高度な電気関係の知識や技術も必要ありませんでした。

ところが、近年の高速信号は、配線しただけでは、まず正常に動作することはありません。電子回路の実装設計は、図面上に描かれた概念的な回路を、物理的な3次元の世界で、その電磁界の挙動を想定しながら実現する役割に変わってきました。誰でもできる作業ではなくなったのです。電子回路の実装設計には、デバイスや配線などを電磁気現象としてとらえることが必要となります。特に、デバイス間を接続する配線部、すなわち信号伝送部は物理的寸法も長いことから、十分な配慮が必要です。

### (1) デジタル信号の高速化と伝送方式のトレンド

近年のデジタル信号速度と伝送方式のトレンドを図1-1に示します。信号速度は、1980年代は数MHz程度、1990年代は数十MHzから数百MHzに増加しています。2000年代以降は、さらに信号速度の増加は加速され、Gbps（ギガビット/秒）クラスになっています。今後、さらに信号速度の高速化は加速されるものと考えられます。

伝送方式の主流は、2000年代まではパラレルバス方式でしたが、2000年代よりシリアル伝送にとって代わられるようになりました。

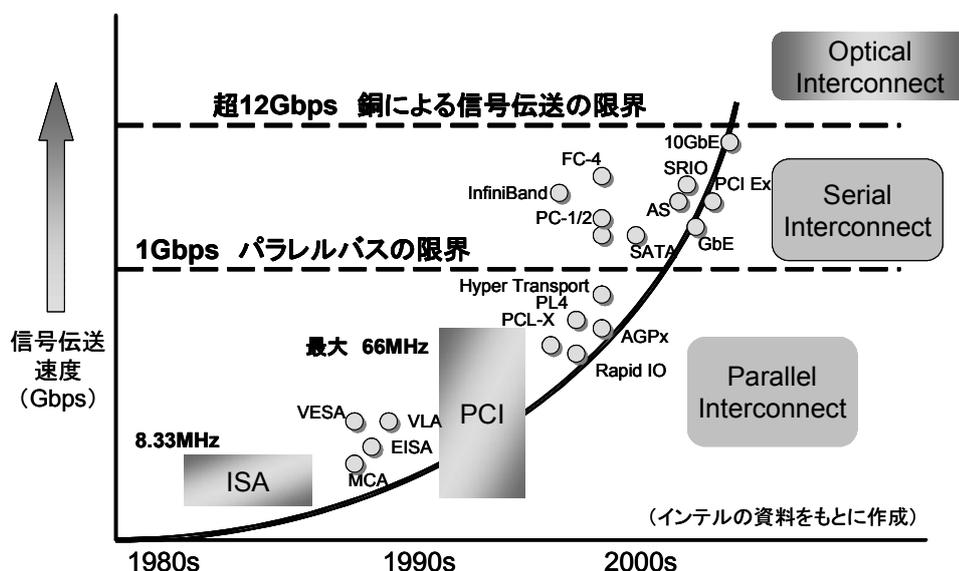


図 1-1 デジタル信号速度と伝送方式のトレンド

(2) デジタル信号の高速化が意味するもの

信号が高速であろうとなかろうと、導体上を信号が進行していく速度は同じです。例えば、真空中であれば、全ての電気信号は光速と同じ速度で進行します。それではデジタル信号の高速化ということは、どのような意味を持つのでしょうか。

デジタル信号は図 1-2 のような矩形の波形をしています。信号の高速化ということは、矩形波の繰り返し周期が短くなる、すなわち、繰り返し周波数が高くなることを意味します。通常、クロック周波数や伝送速度の値<sup>(注)</sup>は、この繰り返し周波数で表されます。また、波形の形を保持するために、立ち上がり時間、立下り時間も短くなります。後述しますが、実は、この立ち上がり時間、立下り時間は、時には繰り返し周期以上の重要な意味を持ちます。

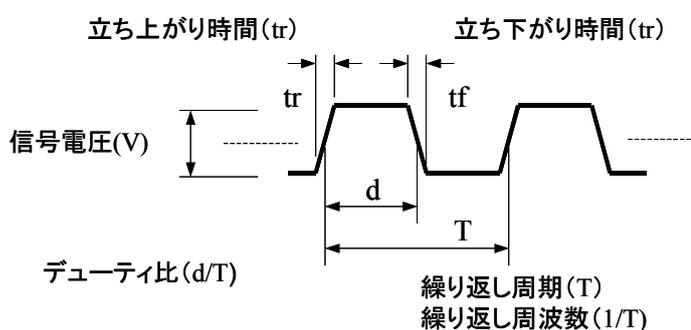
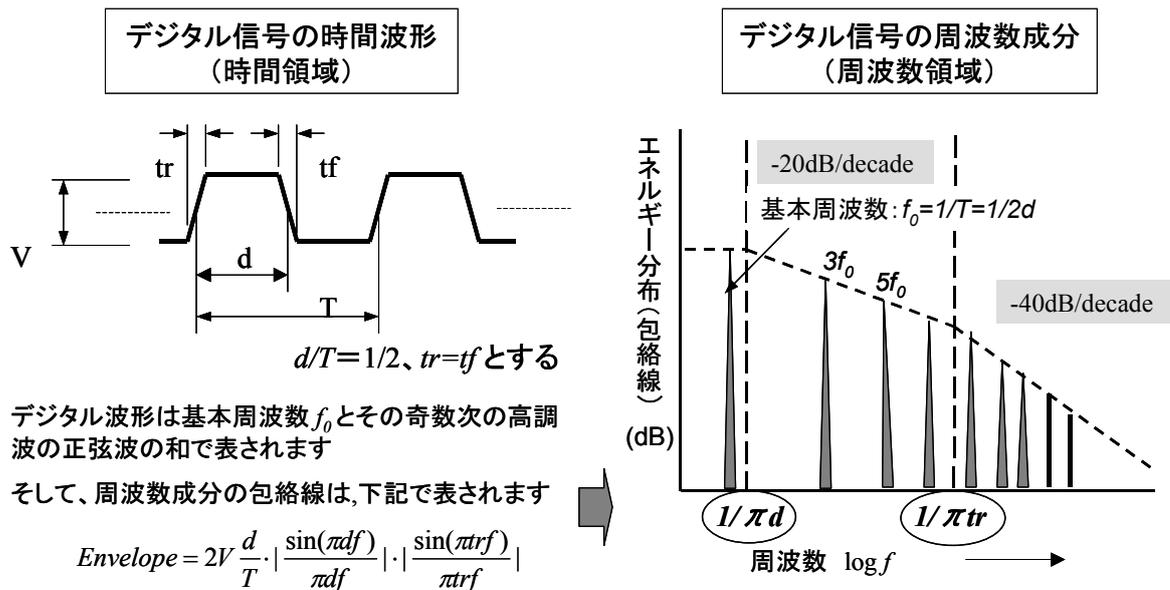


図 1-2 デジタル信号の波形

(注) 伝送信号にクロック（レシーバ側でデータをサンプルするタイミングを生成する同期信号）を埋め込み、 $d$  の時間幅に各データのゼロ、イチを対応させる伝送方式もあります。近年の高速シリアル伝送方式はこの方式を採用しています。この場合の伝送速度は、 $1/d$  ビット/秒で表現されます。

図 1-2 に示した波形は時間軸に対する波形です。なお、波形の分析には周波数成分を確認することも重要です。次に、デジタル信号の周波数成分を見てみましょう。矩形信号をフーリエ変換し、周波数成分に分解すると図 1-3 の右側のようになります。



**ポイント 時間領域と周波数領域**

両方の考え方が必要 時間領域と周波数領域は1対1で対応する

- ・時間領域 — 信号波形、タイミング、エラーや誤動作となる傾向を見る
- ・周波数領域 — エネルギーの分布、各周波数成分の挙動を見る  
(各周波数成分は、それぞれ独立に振舞う)

図 1-3 デジタル信号の時間波形と周波数成分

矩形波は、デューティ比が 1/2、すなわちハイレベルとローレベルが対称で現れば、その周波数成分は繰り返し周波数である基本周波数  $f_0$  とその奇数次 (3, 5, 7, 9...) の高調波成分の正弦波の和となります。周波数スペクトルとしては、 $f_0, 3f_0, 5f_0, \dots$  の周波数のみに線状に現れます。そして、その包絡線は図 1-3 に示したようになります。周波数が  $1/\pi d$  までは周波数に対して一定 (実際には基本周波数  $f_0$  のみですが)、その後、周波数が  $1/\pi tr$  までは、周波数に対して  $-20\text{dB/decade}$ 、そして、周波数が  $1/\pi tr$  以上では  $-40\text{dB/decade}$  となります。すなわち、立ち上がり時間 (立下り時間) が短いと高い周波数まで無視できないエネルギーを持つこととなります。一般に、数十 MHz 程度の繰り返し信号であれば、およそ第 20 高調波程度の高調波成分までを持ちます。

デジタル信号は、クロック周波数や伝送速度で表現される周波数だけで、単純に受けとめることはできません。この周波数の数~20 倍以上の周波数成分 (伝送方式や回路方式による) を問題なく伝送できる設計が必要となります。

なお、伝送特性を議論する場合、時間領域と周波数領域の両方の考え方が必要です。信号波形、タイミングの確認、エラーとなる誤動作の原因追求などには、時間領域で確認します。一方、波形の歪の分析、不要輻射の原因追求などには周波数領域で確認します。

(3) 高速信号の電子回路実装設計に求められるもの

非常に高速な信号伝送は、やはり光伝送となることは明らかですが、電気で伝送できる領域は、コスト、実装上の扱いやすさなどの点から、電気信号による伝送は続きます。

特に、絶縁体に FR-4 材料などを用いるプリント配線板は、コスト、扱いやすさなどから、捨てがたいものがありそうです。プリント板上で電気信号による伝送は、数年前には、2~3Gbps 程度が限界ではないかとの議論がされていました。ところが、伝送制御方式の工夫や新たな伝送方式の確立などにより、現在では、10Gbps も手の届く速度になってきています。とは言っても、その電子回路実装設計が容易になったわけではなく、むしろ、一層、難しくなっています。

高速信号を電気信号で伝送するためには、その基礎となる伝送線路理論を確実に理解しておくことが必要となります。次章で、伝送線路理論の基礎をわかりやすく解説していきます。