

デジタル信号の性質と高速伝送技術

第1回 信号の伝搬は電子の流れによるものではない

志田 晟
Akira Shida

デジタル回路の高速化にともない、確実に安定した伝送技術が求められています。本連載では、高速デジタル信号伝送技術の習得をテーマに、平易で身近な題材を選択し、実験を交えながら解説していきます。
〈編集部〉

● デジタル回路でも信号が線路を伝わるようを知る必要がある！

デジタル回路設計では、電気信号が線路を伝わる時間の差を考えないで設計していることがあります。

しかし、信号の立ち上がり時間が速くなってくると、線路が短い場合でも、線路を信号が伝わる時間や、どのように伝わるかについて正しい理解が必要となってきます。

今回は、電気信号がどのように線路を伝わるかについて、実験とシミュレーションを行いながら検証します。

電子の移動速度とデジタル信号の伝搬速度は別

図1-1は電池に抵抗をつないだ回路です。電池の電圧を V [V]、抵抗を R [Ω] とすると、この回路

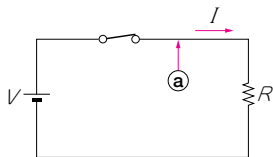


図1-1 電池に抵抗をつないだ回路



図1-2 片道1mの線路の先に付けた電球を光らせる回路

に流れる電流 I [A] は $I = V/R$ と表されます。これは、電気にかかわるエンジニアならだれでも知っているオームの法則です。

図1-1の①の部分に流れる電流は金属線路の中にある電子の流れによるものと言われています。ところが、直径1mmの金属線で1Aを流す場合でも、電子は毎秒0.1mm以下の遅い速度でしか移動できません(コラム参照)。となると、図1-2のように片道1mの線路の先に付けた電球は、スイッチをONしてから何分もたってからでないと点灯しないことになります。しかし、実際にはすぐに点灯します。では、電気信号はどのように伝わるのでしょうか？

信号の伝搬速度を見る実験

● 信号の速度はほぼ光の速さ

写真1-1は木製のテーブルの上に2mの電線を置いて、これに電気信号を加えて波形を見ているようです。図1-3はそれを回路図で示したものです。スイッチでは接点で何度もひげ状の波形が出たりするために、波形がきれいに出るパルス発生器をスイッチの代わりに使用しています。

電気信号がどのように伝わるのかはオシロスコープ

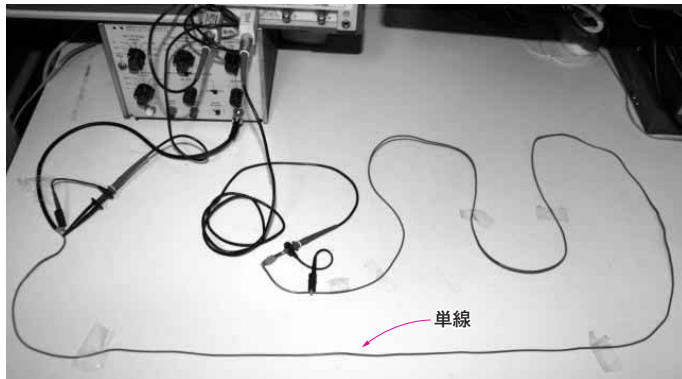


写真1-1 単線に通る電気信号を見る実験

パルス・ジェネレータ

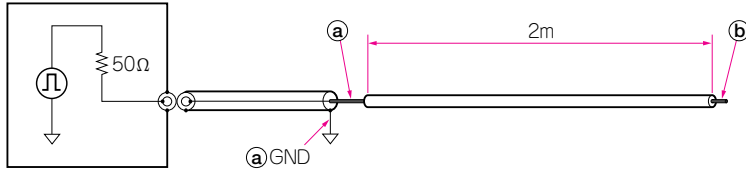


図1-3 電線へのパルス印加と観測点

で観測することにします。ここでは、2 GHzでサンプリングできるデジタル・オシロスコープを使いました。オシロスコープの観測帯域は広い方がよいのですが、比較的入手しやすい**500 MHz帯域**のものを使用しました。観測帯域はオシロスコープの中で波形を増幅するアンプなどの総合的な周波数帯域のことです。

図1-4はこのとき得られた波形です。図1-4の上の波形は図1-3の①点、下の波形は②点です。②点では、波形がある程度崩れていますが、波形の立ち上がり時間の差を見ると**9 ns**と読み取れます。電子の平均速度に比べると非常に高速で信号が伝わっていることが分かります。

銅線を通る電子の速度は 0.07 mm/s と超スロー(2)

金属の中で電気伝導にかかわる自由電子自体は、電圧が加わっていない状態でも金属の中を**毎秒1000 m**という高速で動き回っています。しかし、その向きがばらばらのために、平均すると線路のどちらの方向にも動いていません(図1-A)。

この線に電圧が加わると電子の速度の平均がプラス電圧の方向に移動します(図1-B)。ところが、金属の中は写真1-Aに示すように金属原子(+イオン)が多くを占めていて電子がスムーズに通れない

ようになっています。さらに、これらの金属原子は熱により大きく振動しており、電子の動きを跳ね返しています。

抵抗が無い真空中で電子に電圧が加わるとどんどん加速していきますが、金属の中では抵抗があるために、ちょうど雨粒が空気の抵抗を受けて一定の速度で落下するように、電子も金属内では電圧と抵抗で決まる一定の速度で流れます。それで**オームの法則**が成り立っているわけです。

1 Aの電流を流すと線路の断面を1秒間に1 C(クーロン)の電荷が通過します。1 m³内の自由電子の数を n [個/m³]、線路の断面積を S [m²]、電子の電荷を e とすると、 I [A] 流れるときの電子の移動速度 v [m/s] は $v = I / (enS)$ となります。銅線は $n = 8.5 \times 10^{28}$ なので、 $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C とすると1 mm²の断面の銅線に1 Aの電流が流れるときの電子の平均移動速度は、計算上、**約0.07 mm/s**と非常に遅いことになります。

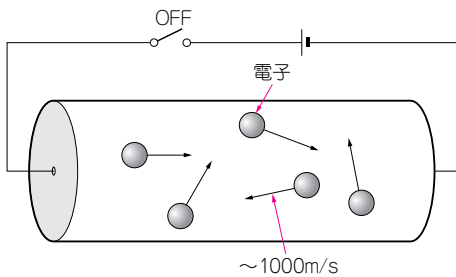


図1-A 金属中の自由電子の動き(電圧がかからない状態)

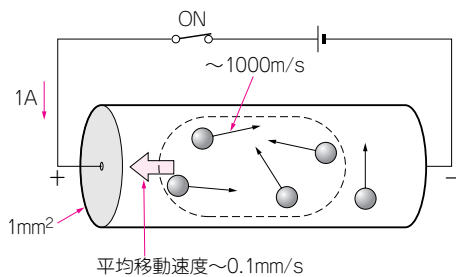


図1-B 金属中の自由電子の動き(電圧がかかった状態)

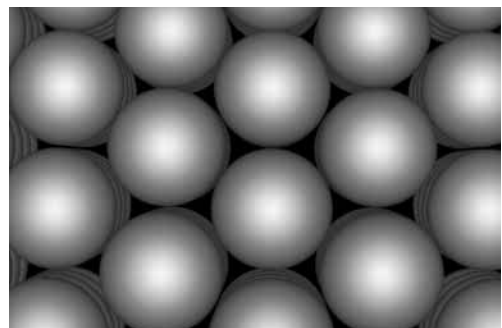


写真1-A 銅金属中の銅イオン

電子はこれらの球(銅イオン)の隙間しか通れない。しかもイオンは熱振動している