

原点から考え、NDMに貢献する。

Non-Destructive Measurement

*Imaging Supersonic Laboratories Co.,Ltd.*

Home-page: <http://www1.kcn.ne.jp/~isl/> or <http://www.i-sl.co.jp>

(有) アイ・エス・エル

〒631-0063 奈良市帝塚山中町 1 2 - 7

+81-742-40-2345 FAX:+81-742-40-2346

Email: [isl@kcn.ne.jp](mailto:isl@kcn.ne.jp)

## 高電圧パルスの立下り（立上り）時間の測定

2010/12/7 宇田川記

オシロスコープには周波数特性があって、立上りや立下り時間の測定で誤差が出ます。超音波用の数 n ～数十 n 秒と高速な送信パルス波形の立下り時間測定では確実に誤差がでます。送信パルスが数百 V と電圧が高いため、オシロスコープに 10 : 1 や 100 : 1 のプローブを接続して測定するのですが、このプローブの周波数特性が極悪い。一般に周波数特性の良いプローブは耐圧が低く、耐圧が高いプローブは周波数特性が悪いとトレードオフの関係にある。

10-90%の立下（立上）時間を T、-3dB 周波数上限を F とすると

$$T \times F \approx 0.35$$

が成り立ちます。（最近のデジタル・オシロスコープ単体では 0.45 近くになっている）

10 : 1 で約 500V 耐圧の市販のオシロ用プローブは DC-200MHz 前後のものが多い。これらは探傷器のスパイクパルスに対しては実は 1kV 以上の耐圧があります。寧ろオシロスコープの縦軸のダイナミックレンジに入らないので、より高い電圧測定には 100 : 1 のプローブを使うが、この場合は高級品（オシロスコープ本体程の値段）で 200MHz 帯域、一般には 50MHz 帯域のものが多い。

例えば周波数が 100MHz と記載されたプローブは理想の立ち上がり 0ns の波形が入力されても 3.5ns の立ち上がりと観測される。250MHz プローブの場合は、1.4 ns となる。オシロスコープ本体は、そのオシロに付属されたプローブより帯域が広い。

なお、実際にはプローブのリード線などの影響でオーバージュートなどが発生し、誤差が増えるので、注意が必要である。必ず付属の短いバネ GND コイルを使うようにする。

立下り時間が T1、T2、T3 の装置が直列につながった場合、全体の立下り T は

$$T = \sqrt{T1^2 + T2^2 + T3^2}$$

で示される。

パルサーの立下りを T1 が 1ns で、オシロスコープの立下りを T2 が 1.4ns、オシロのプローブの立下りを 3.5ns とすると、

$$T = \sqrt{1^2 + 1.4^2 + 3.5^2} = \sqrt{15.21} = 3.9 \text{ ns}$$

と測定される。

逆に上記と同じオシロスコープとそのプローブを使って測定結果が 5ns の場合、

$$T1 = \sqrt{T^2 - T2^2 - T3^2} = \sqrt{5^2 - 1.4^2 - 3.5^2} = 3.3(\text{ns})$$

がパルサーの立下り時間となる。

次の写真は 250MHz のオシロスコープと 200MHz のプローブで測定した例である。

一般的な FET パルサーの場合 5.3ns と計測され、計算すると 4.9ns となる。が、高速のアバランシェ・パルサーの場合 1.9ns で、定式で計算すると虚数となる。計算上ほぼ 0 ns という事である。オシロスコープとそのプローブだけで理想のステップ波形が入っても 2.2ns の立下り時間となる。

この虚数に成る理由はカタログ値より帯域が実際に広い為と、パルサーが高速な為、オーバーシュートが発生して為である。もっと高級なオシロスコープやプローブを使うなどするとより結果が真値に近づくかと言うと、そうでもない。プローブやパルサーの回路や構造をも考慮し検討しないと、真値に近づかない。

一般的に 5ns 以下の立上り、立下り時間の測定は電子技術者にとっても難しい。特にパルス発生装置側の回路や部品の特性がわからないと、最適測定方法も決められない。

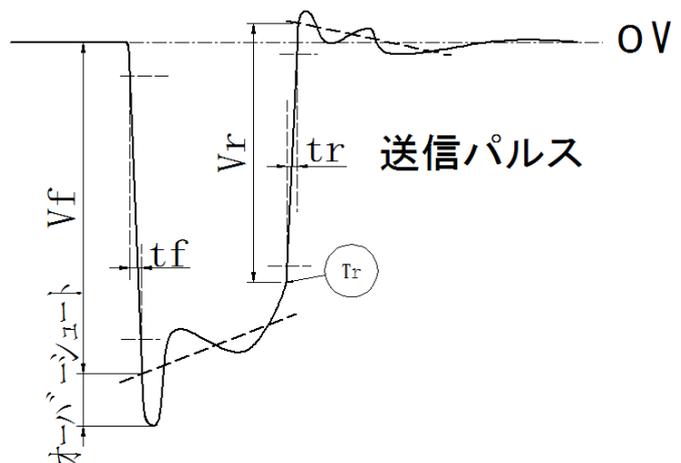
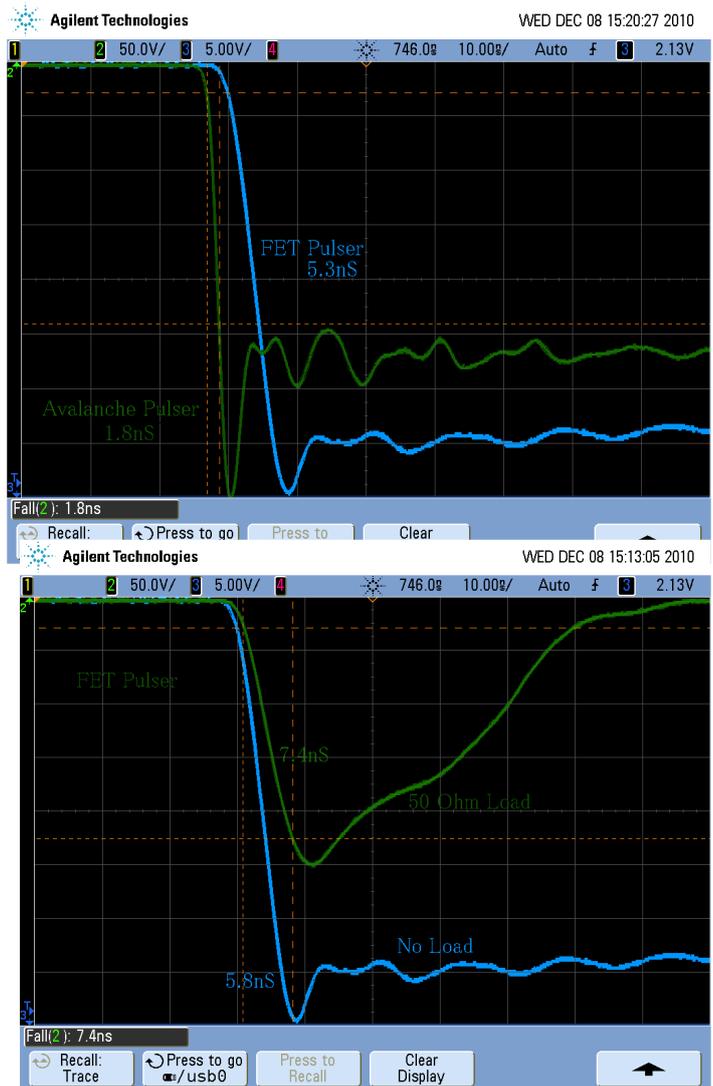
FET パルサーの例で、通過型終端 50Ω を付けた場合を下に示す。少し立下りが遅くなっているが、これも負荷の状態のオーバーシュートが少し影響しているとも言える。その部分を除くと大した差はないようにも考えられる。オシロスコープとプローブで 2ns の立下り時間があるので、2ns 程度の誤差は、測定誤差と考えるしかない。

オーバーシュートの原因の一つは端部での反射である。超音波の場合界面では音圧は最大 2 倍になる。電流も回路の端部では電圧が最大 2 倍になる。性能の悪いオシロスコープのプローブを端部に接触すると波形は訛りオーバーシュートが低くなる。一般に性能の良いプローブほど影響が少なく、より高いオーバーシュートが観測される。下図の様に平均的な傾斜の仮想線を引き、その線と波形の交点を信号の振幅として、その 10% と 90% の高さの点間の時間を測る事が一般に行われている。

### 立ち上がり時間の定義について

技術理論に於いて、ステップ関数を与えたとき、出力が最終値の 10% から 90% (20% ~ 80% 等とする場合もある) に達するまでの時間を立ち上がり時間(RiseTime)と定義された。

上記  $t_f$  も  $t_r$  も共に立ち上がり時間である。非線形を考えていない制御技術理論では共に同じ値を示すはずであり、区別する必要が無



い。実際には非線形素子のトランジスタや FET を用いて回路は作られているし、同じ素子が tr と tf に関与しているとは限らず、両方は異なる。

オシロスコープのデジタル化で容易に立上時間が自動測定できるようになると tf を（波形の）立ち下り時間、tr を（波形の）立ち上がり時間と区別するようになった。しかし、FET など素子単体のカタログでは最初に発生する変化部分 tf を（素子の）立ち上がり時間と呼び、tr を（素子の）立ち下り時間と昔から慣習で呼んでいるので紛らわしい。半導体では tf をターンオン・ライズタイム、tr をターンオフ・ライズタイムと呼ぶ事もある。古くはスイッチング素子に与えた場合、出力電流が増える。最終電流値の 10~90%に変化する時間を立上り時間と呼ぶ。が、高速電流の測定は困難で、電圧で測る事が多い。その場合電圧の立ち下り時間をその素子の立ち上り時間と表記している。素子メーカーによっては電流の立ち上り時間の立ち上り時間、電圧の立ち上り時間と明記する場合もある。非破壊では電圧の立ち下り時間をパルサーの立ち上り時間と規定している。本来測定器=オシロスコープ画面に現れた波形の立ち上り立ち下りに合わせるべきであろう。

### オシロスコープのプロブの使い方

高周波の波形の観測する場合、どの点を基準にしてどの点を測定するかを決めるのが難しい。高周波は材料表面付近を伝わり、直流では低インピーダンスで電圧降下が無さそうな材料でも電圧降下が多い。

定点が波長よりかなり小さな数 mm 異なるだけで観測される波形が異なる。探傷器等はパルス出力にコネクタが付いている。この様な場合は、オシロスコープの



プローブに付属している BNC アダプターと LEMO 変換器など使い、最短の計測経路と成るようにする。リード線が付いた GND 用のクリップなど使うのはもっての外である。

### 探触子波形の計測

配線は概略 1nH/cm のインダクタンスを持っていて太さに測余り影響しない。長くなると相互インダクタンスの為に例えば AWG40 で 10cm では概略 15nH、AWG180 で 10cm では概略 10nH、である。このインダクタンスと浮遊容量の間で高周波リングが発生する。特に探触子は容量の為に、ケーブルのインダクタンスとの間でリングが発生する。探触子ケーブル探触子側とパルサー側で全く異なる電圧波形である事は良く経験する。市販探触子は多くは最大 5nF で、強力なパルサーの場合、数cm以上のケーブルだとリングが発生する。右図は出力インピーダンス 2Ω のパルサーに 15cm の同軸を繋いで、保護膜の無い広帯域探触子から出る音を水中 2.5mm の位置で測定したものである。振動子の容量約 500pF とケーブルやパルサーのインダクタンス成分で高い周波数のリ



ンダクタンス成分で高い周波数のリ

ンギング音が出ている事が判る。この音の周波数は振動子と探触子内部配線、ケーブル長さ、パルサーの特性で変化し、例えば 10MHz 付近の探触子では探触子の周波数=リングング周波数と言う事もある。受信も同じ探触子で行うと、探触子のフィルター機能で基本波以外が殆どなくなるので、リングングは観測されない。パルサの接詮、或いは探触子接詮で電圧を測ってリングングが観測されなくても、振動子端では発生している事があるので、注意が必要である。