

音波のよもやま話 (その8)

各種パルサーと探触子からの音 (1)

Sound form transducer excited by various pulsers

楠アイ・エス・エル 宇田川義夫

一般財団法人電子科学研究所 小堀 修身

東北大学大学院教授 三原 毅

◆はじめに

前回パルス駆動で矩形に近い音波が発生する事を述べた。今後一般に使われてきた各種パルサー (送信回路) の方式とその性能により発生する音がどうなるかを述べるが、その前に知るべき基本知識を述べる。

◆受信音圧波形と探触子での受信信号

探傷器に表示される波形は探触子で受信した音圧波形であると思われる人が多いが、実際には異なる。送信回路の話の前に、簡単に受信音圧波形と表示波形の関係を述べる。探触子

にくくするなどして、膜の共振の影響を少なくしている。「音波のよもやま話 (その6)」で説明した様に保護膜から振動子に入った音圧は音圧の振動子内体積積分相当の電荷を発生する。アンプの入力には抵抗が付いているので、振動子の容量 C がその抵抗 R で一種の CR 微分された電圧が発生する。その過程の例を図1に示す。詳しくは今後の連載に譲るが、受信音の音圧波形と観測波形はかなり異なるという事を頭に入れてほしい。図上が保護膜への入射音圧波形で、中央は保護膜から振動子への入射音圧波形である。保護膜が $\lambda/4$ 膜の為にその共振が加えられ図中段となる。図上と中段では上下が完全に非対称で広帯域な音圧波形である。先端の半波は図上と中段波形では先端半波の振幅が一番高い。図下は振動子とアンプの接続点の電圧波形である。振動子には図中央の音圧が入力するが、振動子の機械共振周波数が強調され、且つ電氣的 CR フィルターの為に低周波成分がカットされ、図上や中段で観測された波形から低周波成分が無くなっている。 CR フィルターで DC 成分は完全に除かれ、先端を除けば、上下対照的な減衰振動になる。図上と中段波形では先端半波の振幅が一番大きい。が図下では先端より次の半波の振幅が大きい。アンプの入力インピーダンスが低い為に発生した RC 微分作用による。正しい音波の音圧波形の測定は今後の連載で述べるが簡単では無い。ハイドロホンで測れば良いと思う人も居るが、この測定では、ハイドロホン自身の形状等の特性上の歪を生じ、音圧波形とは異なる波形が計測される。光弾性など、音と相互作用を伴わない方法が一番正確だが、光弾性法では対象は透明媒質に限られ、光透過部分の平均音圧であるなど、これも測定上の制限がある。現実的に本当の音圧波形は測定不可能と思った方が良く。パルサーからの音波波形は、日頃探傷器画面上で観測される RF 波形とは異

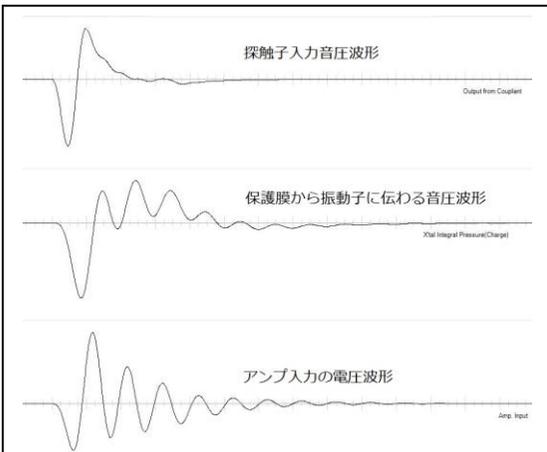


図1 $\lambda/4$ 保護膜探触子入力音圧波形と表示波形の関係例

は前面には整合層又は保護膜と呼ばれる薄い層が配置されている。狭帯域では、この厚さは振動子の共振周波数と同じ探触子基本周波数 F_0 相当の波長 λ の $1/4$ 程度の厚さに作られている。従って大半の狭帯域探触子はどんな音圧波形が入ってきても、保護膜と振動子の共振現象により、この周波数共振 F_0 付近の成分が強調される。広帯域探触子の場合、保護膜厚さを $\lambda/10$ 程度と薄くしたり、複合材料で音速分散して共振し

なる事を認識し、その日頃目にする波形は一度記憶から消去して、パルサーに付いて理解を深めてほしい。

◆電圧駆動電流駆動

基本的な圧電振動子の駆動方式としては電圧駆動と電流駆動がある。まずこれを理解する為に、実験室で良く使われる「定電圧電源」の話から始めよう。定電圧電源は、一定の直流電圧を与えるが、電圧一定だと、負荷によっては大電流が流れると、電源装置或いは負荷が発熱などで破損する事がある。そこで、電流を制限する定電流機能が組み込まれている。例えば実験装置に一定の電圧 5V を与えるが、実験装置を壊さない為に 1A 以上の電流を流したくないと言う設定ができる。図 2 にその様子を示す。破線の様に電流が小さいときは一定電圧 5V を保ち①、電流が 1A を超えると急に電圧を落とす②。デジタル制御だと点線の様に制御できるが、多くはアナログ的制御で、大げさに書くと実線の様なカーブとなる。

図の③の点では電流と電圧の比 $\tan \theta$ を点③での電源の出力インピーダンスと呼ぶ。点③の電圧と電流の比ではない事に注意が必要だ。多くの市販定電圧電源は DC~1kHz では数 mΩ ~ 数十 mΩ である。これが小さいほど、負荷が変化しても、即ち負荷電流が変化しても電圧が変わらない良い定電圧電源と言える。図 2 上では $\tan \theta$ の値は概略 0.4Ω である。

図上⑦付近では $\tan \theta$ の値は 50Ω 程度である。一定の電流に保とうとすると、出力インピーダンスは高くなる。定電流特性の良い市販定電圧電源では 10kΩ を超えるものもある。一定の電圧に保とうとする範囲では出力インピーダンスは低く、電流制限する電流を一定に保とうとする範囲では出力インピーダンスが高い。

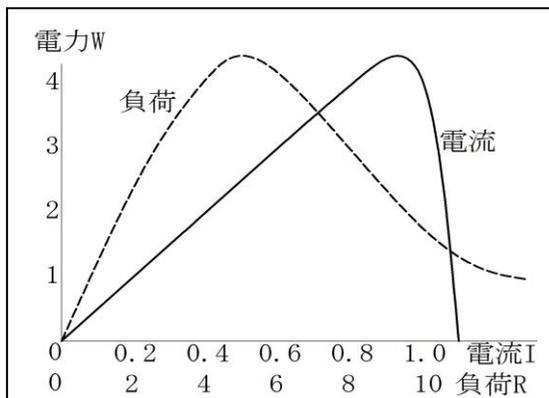


図3 電力の電圧、負荷依存特性

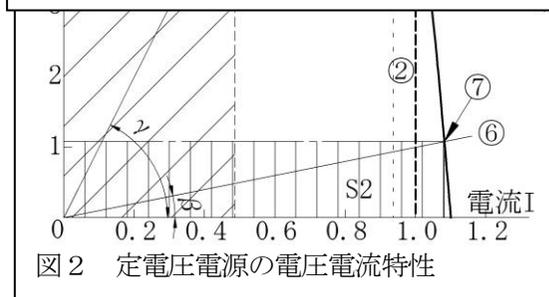


図2 定電圧電源の電圧電流特性

図 2 は静的なグラフだが、例えば③付近で電流が動的に変化する場合、多くの場合③の傾斜より大きくなるが（出力インピーダンスが大きく成る）、小さく成る（出力インピーダンスが小さく成る）場合もある。静的特性は動的特性の目安と思った方がよい。

抵抗 R に流れる電流 I と端子電圧 V はオームの法則の次式で示される。

$$V = IR \quad \dots (1)$$

図の実線の様な電源に抵抗 R を繋いだ場合度の電圧になるか考えてみよう。 $R=10\Omega$ の場合 0.1A で 1V、0.2A で 2V、0.5A で 5V、の端子電圧であり、線④となる。実線との交点⑤が 10Ω の場合の安定点となる。電圧は電流 0.48A 電圧 4.8V となっている。 $R=1\Omega$ の場合同様に線⑥との交点⑦の電流は 1.08A、電圧は 1.08V となる。定電流の領域に安定している。これらの図原点から伸びる直線④⑥は負荷直線と呼ばれる。負荷直線の傾き $\tan \beta \tan \gamma$ は④⑥負荷抵抗相当である。この出力電圧電流特性図から、負荷直線を引くことにより任意の抵抗負荷に流れる電流と負荷の端子電圧を求める事が出来る。

定電圧電源は一種の DC アンプで、図の場合 10Ω 付近の負荷では一定の電圧で動作するが、1Ω 付近の負荷ではほぼ一定の電流で動作する。前者を定電圧駆動、後者を定電流駆動と呼ぶ。

◆負荷への最大電力供給

大きな音を出すなど、大きいと言う事はその音のエネルギーが大きい事を意味する。電気におけるエネルギーは電力とよぶ。電圧 V と電流 I の積が電力で、次式で示される。

$$P = V \times I \quad \dots (2)$$

電力 P の単位は VA 又はワット W である。式 (1) を使えば

$$P = R \times I^2 = \frac{V^2}{R} \quad \dots (3)$$

と書くこともできる。

音の場合、単位面積を通過するエネルギーは

$$P = \frac{p^2}{Z_a} \quad \dots (4)$$

と同じ形式で書け、ここに p は音圧、 Z_a は音響インピーダンスである。なお音波の場合 P の代わりにエネルギーの記号は I を使う事が多い。

従って電圧や音圧が単に大きくても、大きなエネルギーとは言えない。音の場合、この一定面積を一定時間に通過する音のエネルギーを「音の強さ」と呼んでいる。

図2で例えば④の負荷の場合、電圧と電流の積、電力 P は斜線ハッチングの長方形の面積 $S1$ に相当し、⑥の負荷では $S2$ の縦線のハッチングの面積に相当する。負荷曲線の⑧の点で面積は最大になり、この点で最大電力が負荷に供給される。

図3に横軸を電流 I 又は負荷抵抗 R とした場合の電力 P を示す。負荷抵抗の値が図2⑧相当の場合に最大の電力が抵抗に供給される。抵抗値は約 4.7Ω である。この時の電源の出力インピーダンスは約 3.4Ω である。

最大電力を供給するには、「負荷の抵抗と電源の出力抵抗と同じ場合」と書物に載っているが、これは負荷が 0Ω 、即ち短絡しても電圧変化が無い、いくらでも電流が流せる、「理想上の電源」の場合の話である。現実の電源は図2の様に無限に電流は流せないし、一定の電圧でもない。

実際の振動子が負荷の場合、容量性であること、更に振動子が可逆素子であるので、より複雑となる。電氣的に励振して、電気エネルギー

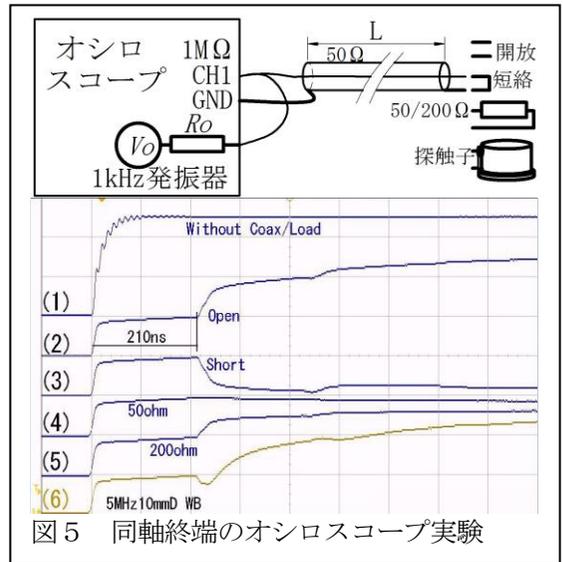


図5 同軸終端のオシロスコープ実験

を振動子に与えると音が発生する。この音が振動子内を移動する。その移動は、振動子による通常の音の受信時同様に発電する。この発電電流が励振回路に逆流する。この辺は追って話すとして、次は終端の話である。

◆同軸と終端

計測機器は入出力インピーダンスが 50Ω と決められている。昔、無線機器用の同軸は絶縁体として伝送損失が一番小さくなる空気を使い、 75Ω の特性インピーダンスものが使われた。今

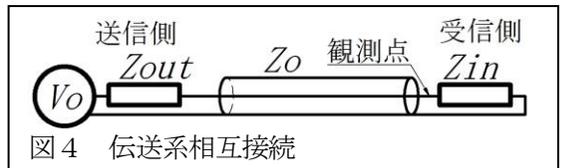


図4 伝送系相互接続

でもビデオやオーディオは 75Ω である。絶縁体としてポリエチレンなどが使われるようになると 50Ω 程度の同軸の場合、伝送損失が最小になるので、多くの無線機器で 50Ω の同軸が使われる様になり、計測機も 50Ω になったようである。

図4の様に接続する機器間での、信号伝達歪を考えてみる。送信側機器のインピーダンスを $Zout$ 、受信側の機器のインピーダンスを Zin 、伝送経路(同軸ケーブル)を Zo とすると、受信点での電圧の反射率は

$$\Gamma = \frac{Zin - Zo}{Zin + Zo} \quad \text{式(5)}$$

となる。境界での音の音圧反射率の式と同様である。

Z_{in} が開放の場合、即ち $Z_{in}=\infty$ だと式から Γ は 1 で、 Z_{in} が短絡の場合、式から Γ は -1 である。-1 は反転する事を示し、1 はそのままと言う事であり、音の反射と同じである。

$Z_{in}=Z_0$ の場合に Γ が 0 となり、反射しないで負荷に全ての電力が吸収される事になる。

ここで実際に観測する事にしよう。多くのオシロスコープには 1kHz の矩形波発振器が付属している。オシロスコープに繋げる 10:1 プローブを校正する為に必要な為である。この発振器の出力インピーダンスは 50Ω ではない。図 5 の上の様にオシロスコープの入力に 1 kHz 発振器を接続し、時間軸を拡大すると、図 5 の波形の (1) の様な 2.5V 程度のステップが観測される。この状態で長いケーブルを接続すると (2) となる。オシロスコープの入力インピーダンスは 1MΩ と大きいので無視できるとして、信号源の発生電圧 V_0 は 2.5V である。(2) の様に 50Ω 同軸を繋ぐと階段状に上がっていき最後は 2.5V となる。一つの階段の幅は 210ns と計測される。電気信号(電波、光、ガンマ線)は空間を伝わる場合は約 30 万 km/s、即ち 1m 当たり約 3.3ns かかる。物質中、同軸や線などを伝わる場合に速度が落ちる。この速度低下率を波長短縮率と呼ぶ。ポリエチレンを絶縁体とした 50Ω 同軸は径に関係なく波長短縮率は約 67% である。1m 伝搬するのに電磁波は約 3.3ns かかり、その 1/0.67 倍で $3.3ns/0.67=4.9ns$ かかる。210ns は同軸を往復した時間なので $210/4.8/2=21.4m$ となる。実際に繋いだケーブルは 21.2m である。伝搬時間からツイストや同軸ケーブルの長さを測る機器は TDR(ケーブル測長器として市販されている。TDR(Time Domain Reflectometry 時間領域反射)法は以降で説明する様にインピーダンス・アナライザにも使われる方法でもあるが、オシロスコープさえあればトグルを巻いたケーブルの長さを測る事ができる便利な方法でもある。

210ns 幅の最初の階段の高さは約 1V である。1kHz の信号源が電流飽和してなければ(定電圧駆動状態であり、定電流駆動でなければ)、この信号源出力インピーダンスが 75Ω とすると、同軸の負荷 50Ω の端子電圧が $2.5V \times$

$50/(50+75)=1V$ となり理解できる。この場合の電圧反射率 Γ は式(4)から 0.2 である。

同軸が 50Ω で信号源が 75Ω なので、この接点でも反射し、同軸の開放端に再び信号が送られるので、210ns 毎に徐々に 2.5V に近づく波形が観測される。(1) での細かな凸凹は内部配線と外部配線の全長さ相当のピッチで同様の反射が起きている。インダクタンス成分もあるので、少しオーバーシュートが観測される。

次に同軸端を短絡してみよう。すると図の (3) の様に 210ns 幅のパルスが観測される。信号源インピーダンスが同軸と同じではないので、210ns ごとに上がったり下がったりしながら最終的に 0V となる。短絡側では反転全反射し、75Ω の信号源側では一部 75Ω に吸収され、一部同相で反射する。

信号源インピーダンスが 75Ω でなく、50Ω だと綺麗な矩形波が得られる。このパルス発生方法は半導体では発生困難な、時間幅が短い高圧パルスを発生するのによく使われる。

次に 50Ω 同軸端を 50Ω のターミネータで終端してみると (4) の様にきれいなステップが観測される。50Ω 以外例えば 200Ω では (5) の様に少し反射が観測される。信号源が整合されていなくても同軸端を正しく終端されていると反射は起きない。逆に信号源側が整合していると、負荷が非整合で、反射が信号源に戻ってきても、全て吸収される。

探触子は多くは容量性で、その例を (6) に示す。探触子は純抵抗でないので、同軸とは整合する事が不可能である。容量は高周波ではインピーダンスが低く、低周波ではインピーダンスが高い。別の言い方をすると、瞬間電圧を変えようとしても電圧が変化しない短絡状態であり、ゆっくり電圧を変えると、開放状態と似た応答をする。(6) を見ると 210ns の時点で短絡 (3) と同じ様に下がり始めるが少し経つと開放 (2) と同じように電圧が上がっていく。

この端部での反射の現象は、音響境界層での反射と全く同じで、図 5 を十分理解すると、音波の反射も容易に理解できる。

◆ケーブル長さや反射の影響

前述の様に探触子を繋ぐと反射が起きる。後で説明する様に殆どのパルサーの出力インピーダンスは 50Ω でない。多くは 50Ω より低い。従って同軸ケーブル接続端で電気信号の反射が発生し、その電圧が振動子に加わるので、思いも

しない音が発生する。図 5(6)のケーブル反射は 210ns 周期で 5MHz の探触子の周期 200ns とほぼ同じで、影響は無視できないだろう。広帯域で分解能が良い探触子でもケーブル反射による邪魔な多重エコーが観測される。図 5 ではどの場合も、反射するたびに段々振幅は減衰する。使う周波数より、反射周期が十分短ければ、終端の整合が不適切でも、影響が無視できよう。

電気技術者の経験的値として、同軸の長さが観測波形波長の 1/20 相当以下なら無視できるとしている。実際には無視できない事もあるが、非破壊計測では滅多にない。

5MHz の探触子の場合、周期は 200ns で 1/20 は 10ns となる。50Ω の同軸内の信号伝搬は 4.9ns/m 相当なので $10\text{ns}/4.9\text{ns/m} \approx 2\text{m}$ となり、市販探触子ケーブルの長さ 1.8~2m と一致する。この長さを決めたのは、偶々なのか、電気的常識から計算されたのか筆者は知らないが、無意識で検査技術者はケーブル反射を無視できる長さの探触子ケーブルを使っているのである。

無視できなくなるのは、長い延長ケーブルを使う場合や、高い周波数の探触子を使う場合である。例えば 50MHz の探触子では、20cm と 2m のケーブルでは全く異なる波形が観測される。

また、市販されている標準的探触子を除いてはインピーダンスが 50Ω から極端に離れている事がある。こう言う場合は、僅かなケーブル長さでも、そのインダクタンスやコンデンサー成分が波形に影響する。細かな実験をする場合は数 cm 以下の長さのケーブルで実験するのが無難である。

◆ファンクション・ジェネレータでの駆動

各種実験にファンクション・ジェネレータ(以降 FG)が使われる。当然出力インピーダンスは 50Ω である。内部構造を図 6 に示す。発生した波形はアンプで増幅されるが、出力インピーダンスがほぼゼロとしている。その後無誘導抵抗

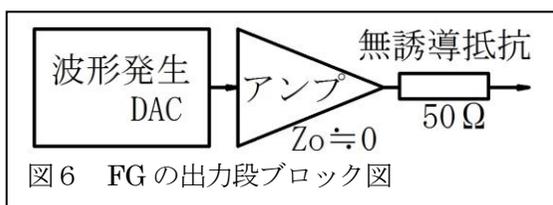


図 6 FG の出力段ブロック図

導抵抗 50Ω を通して出力に繋がる。広い周波数範囲に渡って、出力インピーダンスは実質 50Ω となる。

最大出力電圧が低い機種では出力が短絡しても、電流飽和は起きない。何を繋いでも出力インピーダンス 50Ω の波形発生器となる。最大出力電圧が大きい機種や最高周波数が高い機種では、大振幅の信号を発生する場合、負荷が小さいと電流飽和する。親切な機器では、負荷が小さすぎると警報が出る。

FG で一定の電圧を発生した場合に、FG は定電圧駆動でも、定電流駆動でもない駆動状態である。定抵抗駆動とよぶ。中身のアンプを直接使えば、定電圧駆動となる。出力インピーダンスがほぼゼロで負荷を駆動する場合は強制電圧駆動と呼ぶ。が負荷が重たいと電流飽和して波形は歪む。

通信機器、計測機器の出力は定抵抗駆動であると言える。長い 50 オームのケーブルを接続した場合の電力損失と波形歪を小さくできる。

図 7 は抵抗とコンデンサー、探触子を電流飽和しないタイプの FG で駆動した場合の波形で

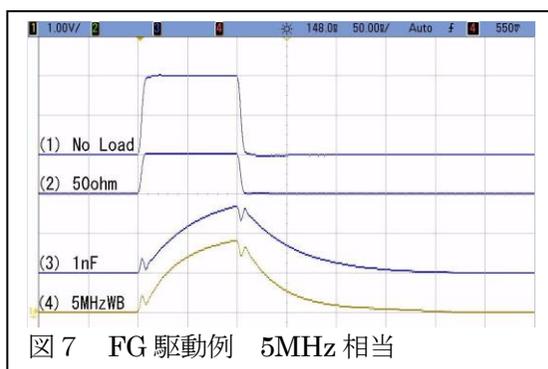


図 7 FG 駆動例 5MHz 相当

ある。スクエア・パルサーを模擬しているが、実際のスクエア・パルサーは理想の矩形波ではないし、理想定抵抗駆動でもないが大まかな様子は判る。

FG で 100ns1V のパルスを発生した。(1)は何もつけない場合の FG の出力波形である。50Ω の負荷を付けると振幅は半分になる(2)。(3)は

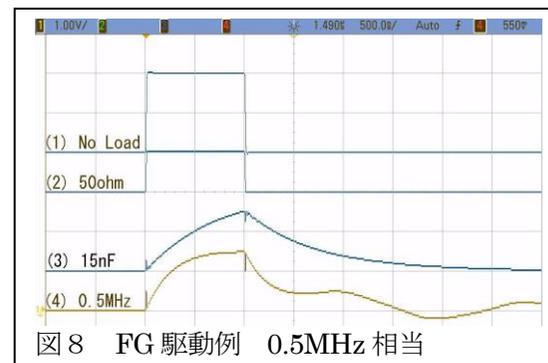


図 8 FG 駆動例 0.5MHz 相当

1nF の周波数特性が非常によいコンデンサーを付けた場合、50Ω と 1nF の RC 積分カーブとなっている。(4)は静電容量が 1nF の 5MHz10mm 径広帯域探触子を繋いだ場合である。感度の悪い振動子やバックিংを貼って広帯域にした振動子は、コンデンサーと同じ様な波形が観測される。

図 8 は 1μ 秒のパルスにて計測した結果で、(1)(2)(3)は前図同様で、(4)は 0.5MHz の感度の良い狭帯域振動子を駆動した場合である。振動子の低周波での容量は 16nF である。(3)と異なり RC 積分カーブから極端にずれている。図 7 でもよく見ると違う事が判る。駆動が定電圧駆動でなく、定抵抗駆動なので、振動子内部を往復する音で発電した電荷が FG に逆流して重畳されたのである。

なお、何れの図でも(3)(4)で、矩形励振の立ち上がり・立ち下がり時点で小さなスパイクが観測されるが、これはケーブルなどの影響ではなく、FG 自体の性能で、高周波特性の良い FG ほど大きく出る傾向にある。無誘導抵抗の電極間は空間の誘電率で繋がっていて、リーケージ容量をゼロにする事は不可能である。振動子からは振動子の共振周波数相当中心の音の他、このスパイク状の音も発生し、観測される。測定器の負荷は 50Ω 純抵抗を前提に設計されるので、振動子の様な容量性負荷に対してあまり考慮されていない。製品の電源からのノイズなどの影響を調べる為に使う交流電源では容量負荷を考慮したものが多く、比較的低い周波数の超音波圧電素子用アンプとして使える。

◆励振電圧と電流

ケーブル反射など思ってもいない波形が発生している事もあるので、パルサーレーザを使って研究開発する場合は必ず電流と電圧を測定する必要がある。励振電圧は周波数帯域が十分あるオシロスコープに 10MΩ や 100MΩ プロローブを繋いで測定すればよい。電流は、オシロ

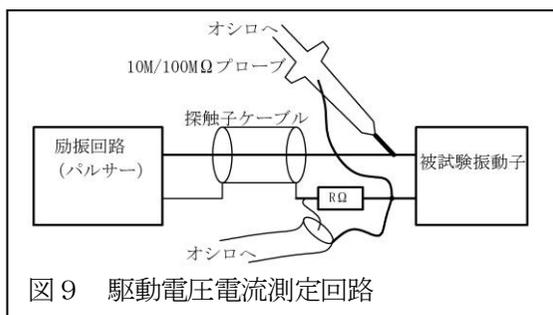


図 9 駆動電圧電流測定回路

スコープ用の電流プローブもあるが、周波数帯域がそれほど広くない。通常は GND 側に小さな抵抗を入れて、電圧降下を測定する方法を用いる。図 9 の様に振動子の近い部分に周波数特性の良い数 mΩ ~ 0.1Ω 程度の抵抗をリターン側に挿入し、そこに流れる電流による電圧降下を測定する。同じオシロスコープで電圧と電流を測定する場合は図の様に振動子の直近で一点アースして測定する必要がある。探触子ケーブルの駆動 (パルサー) 側で測定すると、実際に振動子を駆動している電圧電流波形と異なる可能性が高い。必ず振動子直近で測定する必要がある。場合によっては探触子の中の僅かな配線が影響する事もあるので、注意が必要である。電圧と電流波形が測定できると、掛け算で探触子に供給した電力が計算できる。

◆あとがき

今回パルサーの話の前の前準備として駆動方式、同軸ケーブル両端反射などの話をした。次回実験によく使う RF アンプでの励振を中心に話す。

◆今回知った事

- (1) 探傷器の RF 画面の波形は、探触子に入射する音の波形とは全く異なると思え。
- (2) アンプの駆動方式には定電圧駆動、定電流駆動、定抵抗駆動がある。
- (3) 負荷に最大電力が供給されるのは、出力インピーダンスと負荷が等しい時とは限らない。
- (4) 同軸の方端が整合されていると、反射による波形歪を無視できる。
- (5) 探触子ケーブルは使用する探触子の波長の 1/20 相当の電気長と同軸を使うと、ケーブル内の反射歪を無視できる。
- (6) 高周波の探触子や標準探触子以外はケーブル長さを成るべく短くした方がよい。
- (7) FG は定抵抗駆動
- (8) FG で振動子を駆動すると、容量を駆動した時と似た積分的駆動電圧になる。
- (9) 逆起電力の大きな振動子を FG で駆動すると、容量駆動と異なる波形になる。
- (10) 研究開発する場合は必ず駆動電流と電圧を測定する。

<参考文献>

超音波技術入門—発信から受信まで(2015/04初
版2刷、日刊工業新聞社)

-
-