

「発振器の系譜(1)」

- 機械振動からLC共振、水晶に -

松本栄寿

前回、負帰還(ネガティブフィードバック)は地上から宇宙まで、どこに使われる機器にもあると説明したが、正帰還(ポジティブフィードバック)を応用した発振回路もどこにでもある。しかもその用途は電気機器に限らず、一番身近にはデジタル時計、クォーツ式アナログ指針時計でも、携帯電話でもそれぞれ要の役目を担っている。

真空管あるいはトランジスタを使ったラジオ・テレビの中身を眺めると、そこにあるのは高周波増幅器、オーディオ増幅器ばかりではない、かならず周波数を変換するスーパー回路があって発振回路がそのキーを担っている。テレビ画面をスキャンするタイミング信号にも発振回路がある。当然ラジオ・テレビ放送局の大元送信機には発振回路がある。ここではそういった電気回路、電気部品をテストする計測器としての発振器の系譜をたどろう。連続した正弦波を発振する発振器から、

矩形波や三角波を発生する特殊波形発生器回路もある。計測用発振器には、周波数を連続して変えられるものと、あるいは周波数の安定度を求めるものと、相反する性能が求められることがある。

測定器から派生して、周波数の安定度を追求した小型発振器は時計用のクォーツ水晶発振器であろう。

メトロノーム・タイマー

発振器と聞くと四角な箱で真中にダイヤルのついた装置、CR発振器、オーディオ発振器、無線用発振器とさまざまだが、トランジスタや真空管がはじめてから使われていたわけではない。発振器は真空管のような能動素子が出現する以前からあった。

はじめは電気機械的素子を使った固定間隔のタイミング信号や、固定の周波数発生器が試験用に

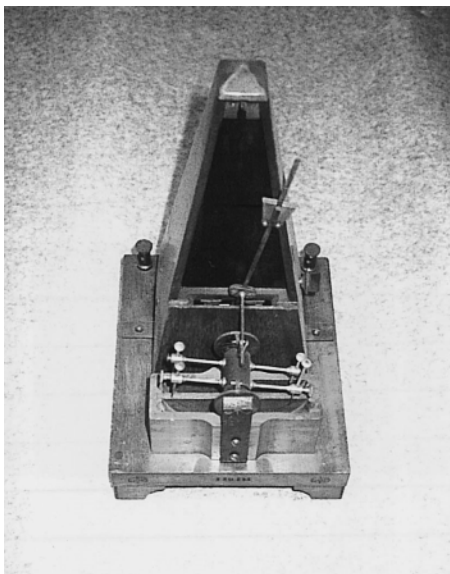


図1 メトロノーム・タイマー(a)

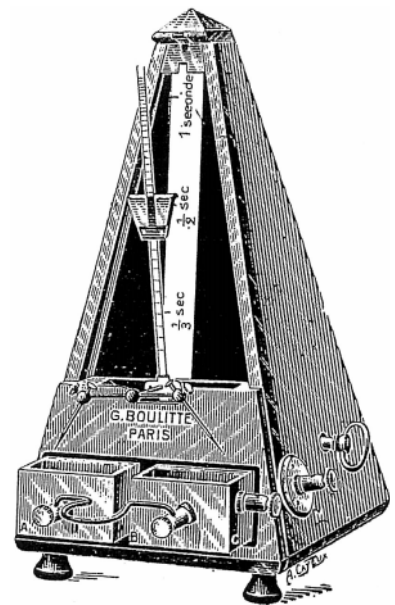


図2
メトロノーム・
タイマー構造
図(b)

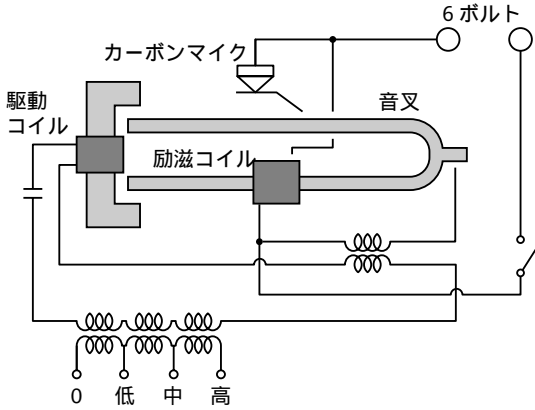


図3 音叉発振器原理図

使われ、しだいに真空管とLC共振回路をもつ周波数を変えられる発振器へと開発が進んだ。

図のメトロノーム・タイマーは、現代のセンスの発振器とは言いがたい。私が1999年、パリのヤコブ通りの街角の古道具、古書店を訪れたときに奇妙な機械を見つけた。そこは、アラン・ブリュー書店と名乗る店で¹⁾、骨董的な書籍のほかに100年以上前の科学、技術、医用の道具が棚に並んでいる。棚をつぶさに見ていくと、アンティークなケルビン静電電圧計に出会った。博物館でないと見られない年代物である。この店は、フランス技術工芸博物館(MAM)のジャコミー館長に紹介していただいた。パリにも古書販売は何軒もあるが、年代物のインスツルメンツはここだけだとの話をうかがって興味半分に訪れ、目にとまったのがこのメトロノーム・タイマーである。

このヤコブ通りで見つけて購入した「メトロノームを応用したタイミング発振器」は、同じ古書店から手に入れた「フィギエの科学啓蒙書」²⁾と同様に、計測や電気の歴史をたどる上で大変貴重である。モノやインスツルメンツを収集しても、その中身を調べるには史料が不可欠である。また、こういった史料を日本でを見つけることは、モノ以上に難しい。

奇妙な機器は前面から見ると普通のメトロノームに見えるが、そのカチカチとゆれる機構の下部に横向きレバーと2組の針状接点がつけられている。メトロノームを動かすとその針の先が小さなくぼみに交互に下りるように動く。くぼみは2つ



図4
音叉発振器
(横河Y T,
1940)

あって、ここには水銀を入れたらしい。推察するに針と水銀を接点に利用した、電気のタイミング信号発生器であろうか。

メトロノームとは巧い考えである、タイミングの周期は遊標(錘)の位置を上下に動かして変えられる。発振器でいえば周波数を変えられる。目盛には1/6から2秒までとある。動力もゼンマイで電池も要らない。このとき入手した簡単な資料には1928年と記述があるのみで、今のところ私にもどう使われたか分かっていない。タイミングの周期から医用機器の用途かも知れない。しかし、この時代の発振器は発信器とつづったほうがふさわしい。電気でなくメカニカルが中心であるからである。

おんさ
音叉発振器

電気の応用は、まず電信(トンツー)から始まり、ついで電話、つぎにエジソンの電球、無線、エレクトロクスの順序である。それらの道具や機器を開発するときや、現場で使うときには何らかの電気計測器が必要であった。だが、初期には意外なほど単純な計測器であった。電信時代はどんな計測器があったか、せいぜいホイートストーンブリッジ(14回)とガルバノメータである。電話の時代は、それに加えて音声の伝送特性をはかる必要があった。つまり人の音声周波数で、電話の送信、受信器、伝送の電話線の特性を調べる必要が生じた。

最初の電気信号発生器は、今でも家庭でつかわ

れるブザーと同じ構造であった。乾電池一本の電源で数100ヘルツの交流を発生できる。ただ、正弦波のようなきれいな波形は得られない、今日のノイズ波形に近かったかもしれない。ついで登場するのは音叉である。ピアノなど楽器の調律に使われたチューナー(音叉)が、かつて電気信号の発振器に使われた。長距離の電話線は、まず800ヘルツや1,000ヘルツでテストした。それには信号の発生器、受信器が必要になったわけである。

図の中央に音叉がある。一方の腕に励磁コイル、もう一方に音叉の振動を電気に変えるカーボンマイク、先端に駆動コイルが取り付けられている。音叉からマイクに1,000ヘルツの振動が伝わると、中のカーボン粒の接触抵抗が変わり、その出力は駆動コイルに正帰還になるように接続されていて、振動が持続する。全体は6ボルトの乾電池一つで動作するために、電話の工事現場から電話交換機室までどんな環境でも使えた。音叉発振器は、楽器の調律に使えるほど周波数も正確で安定していたし、どこでも使える計測器であった。また、電話線のテストだけでなく、電線やコンデンサやインダクタンスの特性をはかる、ブリッジの交流周波数源としても使われていた。

通常、音叉の材料はエリンパーが使われた。その周波数の温度係数は 10^{-5} 程度である。細かには、フォークの支持状態、周囲の気圧が変化しても共振点が僅かだがかわるから、一定の高温槽内に収容すると 10^{-6} 程度の安定性が得られる。

さらに、音叉発振器にもやがて真空管が使用されより安定な発振器になる。音叉といいメトロノームといい、音楽で使われる道具が電気の世界で使われ、また、電気回路から生まれた発振器が、音楽のレコーディングの道具、録音装置の調整道

具となっているのを見ると、不思議な感覚に浸る。

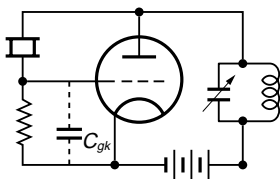
真空管発振器の登場

真空管は、まず検波器としてコヒーラを打ち負かした。次に三極管をつかった発振回路は永続的な電波を発生することが買われ、無線送信機の火花放電送信機を追放した。真空管の応用がますます広がる途上であった。ハートレー回路、コルピッツなどの基本となる発振回路が考案され、電信の送信機、ついで電話の試験機、搬送増幅器にまで使われ出した。いずれも発振回路はインダクタンス、コンデンサのLCの共振を使った。したがって、周波数を変えてやるには、インダクタンスやコンデンサを変化させてやる必要があった。

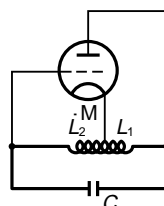
インダクタンスとコンデンサの共振回路は、高いQがとれるが、この同調回路から直接電力を取り出すことはできない。これを救うのが真空管である。グリッドの高インピーダンスで信号を検出して、プレートからの電力を利用する形になる。その間の正帰還結合を利用して発振を維持させる。

LC共振と真空管を使った発振方式は無数に存在するが、できるだけ簡単に性能のよい方式をめぐって多くの発明家が競った。ハートレー、コルピッツ回路などがそうである³⁾。高周波発振器なら可変コンデンサと空芯のコイルで構成できるので、可変コンデンサを回転させての容量をかえてやれば、周波数を連続に変える発振器ができた。その軸に目盛版をつければ発振周波数が読めた。しかし、20kHz以下のオーディオ周波数ではインダクタンスやコンデンサの値が大きくなって、その値を連続して変えてやるのが難しい。複数のコンデンサを使ってスイッチで切り替えて、周波

水晶発振回路



ハートレー発振回路



コルピッツ発振回路

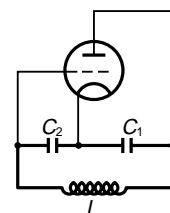


図5 水晶発振回路、ハートレー発振回路、コルピッツ発振回路

数を変える方式がとられた。また、高周波発振器でも、可変コンデンサの回転角と周波数は直線にはならなかった。

さて、発振器はどうして発振し始めるかをご存知であろうか。実はまったく静かな環境では真空管回路はじっとしたままで、発振もはじまらないし、停止することもない。回路に電源スイッチをいれたショックで、わずかな回路ノイズが発生して、それが増幅されて正帰還されて発振が始まることになる。

発振器には安定度が求められる。とくに使用している最中に周波数や振幅が変わらないことが必要である。真空管の特性も影響を与えるが、電源電圧が変動しても、周囲の温度や湿度が変わっても、さらに電気部品や機構部品の経年変化に耐える特性が求められる。通常求められるのは 10^{-4} 、水晶発振器で 10^{-7} 以上である。

LC共振回路は理論式は単純であるが、正確で安定な周波数を得るのは簡単ではない。つまり理想のL、理想のCは実際には作れない。インダクタンスにもわずかな浮遊容量があり、コンデンサのリード線にもインダクタンス分がある。その影響は発振器の周波数範囲によっても変わる。発振器の範囲は広い。20kHzまでのオーディオ発振器と、メガヘルツの発振器、ギガヘルツの発振器は、回路構成や構造が大きく異なっている。

やがて、オーディオ発振器では内部に2台の発振器をもって、そのビートから低い周波数を得るヘテロダイン方式が工夫されるが、ダイヤルの目盛から周波数を直読できる発振器はできなかった。目盛を校正カーブで補正する必要があった。なんとかLC回路を脱却しようとしたのが、コンデンサと抵抗を使ったCR発振器であるがこれについては次回ふれよう。

現代では時間信号を得る装置、オシレータのような回路はほとんどがエレクトロニクスである。しかも装置の中をのぞくと、トランジスタ、ICが組み合わされたアナログ・デジタルの混合回路である。ただ、周波数の安定さでは水晶発振器が抜群である。

水晶発振器

周波数精度の追求は、音叉やLCから水晶発振

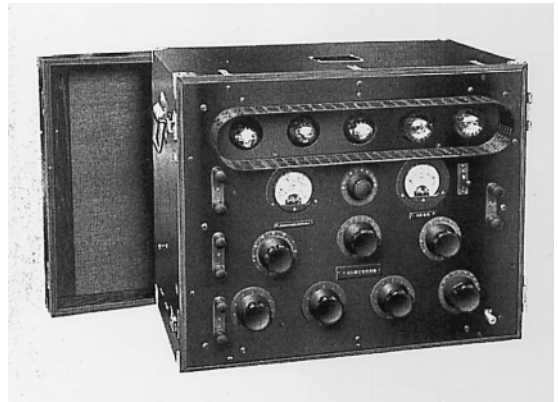


図6 真空管発振器(横河Y A, 1940)、50Hz 50kHz
周波数はスイッチ

器に引きつがれる。水晶の物理的な大きさで周波数が制限されるが、高い周波数は水晶の薄さの限界できまる。厚さは1/100ミリ程度まで作られ、水晶から直接得られる周波数は1kHzから100MHz程度である。その範囲外は通信や分周のデジタル回路が支えてくれる。

デジタル時計の心臓部に水晶が使用されていることはよく知られているが、日本が実用化した技術ともいえる。水晶発振器はピアス回路(1923)が有名であるが、安定な周波数と温度の影響を受けない水晶の製作、加工法などは日本の古賀逸策氏の研究が大きく貢献した。

かつて通信工業の世界にもっとも貢献した素子は、真空管、それに次いで水晶であると言われた。しかし、現代はそれにも増して水晶発振器のお世話になっている。トランジスタやICと一体になったクォーツ時計は、熱帯のジャングルでも、宇宙のかなたでも、深海の底でも「水晶の精度を誰にでも提供して」正確な時間を刻んでくれる。

電気の世界のとどまらず、1970年代以降、水晶発振回路は機械時計を駆逐した⁴⁾。

<参考文献>

- 1) 所在地: Albert Blanchard; 9, rue de Medics F.75006 Paris
- 2) LOUIS FIGUIER, "LES MERVEILLES DE LA SCIENCE", (1870)
- 3) 川上正光、「電子回路」、共立出版(1956)
- 4) Calene Stephens, "On Time", Bulfinch Press Books, (2002)