

電子デバイスの特徴と進化

— 真空管式電子計測器の機能修復および応用実験を通して —

倪 永 茂

はじめに

電子立国といわれる日本は、ソニーをはじめ、電子産業各社のトランジスタによる携帯電子製品の開発・製造によって一世を風靡し、日本を当時の世界第2経済大国に押し上げた。トランジスタは1947-48年米国ベル研究所によって発明されたものであったが、電子回路そのものは100年も昔から、多くの先人たちの研究によって開発・改良され、多くの分野では1950年代にすでに完成の域に達していたといわれる。1950年代まではキーとなる電子デバイスはトランジスタではなく、真空管がその役割を担っていた。

ほとんどの真空管に関する製造はロシア・中国・東欧等の僅かな国を除き、世界的にすでに30年前にストップしていた。キーとなる電子デバイスはいまやトランジスタでもなく、その集積回路であるICやLSIに移っている。しかし、真空管式オーディオアンプや真空管式ギターアンプにまだ大勢の熱狂した愛好者がいて、レコードやCDと同様、市場から完全に消えたわけではない。

ICやLSIは集積度が高いだけでなく、より高性能、より小型化を追求するため、サイズもどんどん小さくなり、ひとの手でハンダ付けしたり交換することすら大変困難になってしまった。電子回路初心者や教育の現場では、目に見えて電子工作できるトランジスタ等が却って歓迎される。

本文は、聴覚によらず、科学的データの取りやすい電子計測器を例に、真空管とトランジスタの特徴や進化について具体的なデバイスを通して考察するものである。つまり、真空管式電子計測器である、菊水電子工業社製交流電圧計(ミリバル、Vacuum Tube Volt Meter) 161Aの機能修復、およびその後の一連の応用実験を行い、個々の電子デバイスの特徴や違いを説明する。モノづくりの一環として日本では重要視されてきた電子工作の実践に必要なノ

ウハウを継承していくためにも、教科書に書かれないアイデアや令和時代にマッチした知識・知恵が必要であろう。

I 真空管式ミリバル 161A の概要および機能修復

菊水電子工業製交流電圧計 161A (製造番号 13332xx、図1) は、周波数が1Hz ~ 1MHz (実用的な測定帯域は7Hz ~ 700kHz)、実効値が1mV ~ 500Vの交流電圧を測定する電子計測器である。搭載されているパーツの製造年月から昭和43(1968)年頃の製品だと推測される。

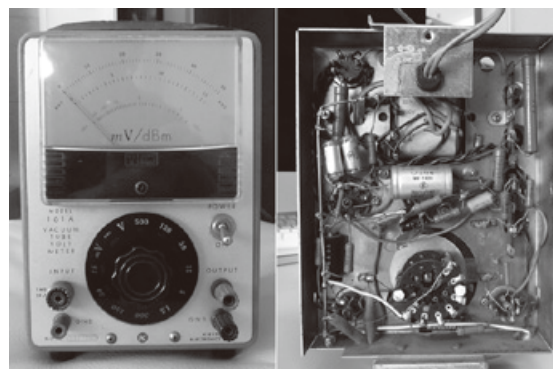


図1 計測器の外観と内部

電圧は主な物理量のひとつであり、質量、長さ、時間、電流等と同様、その計測の重要性はいうまでもない。直流電圧や、低周波数(数十kHz以下)の交流電圧なら市販されている低価格のデジタルマルチメータで手軽に誰もが測定することができるが、より高い周波数の交流電圧になると、その大きさ、波形、周波数成分を調べるには、本測定器や、オシロスコープ、スペクトラムアナライザ等の専用測定器が必要になってくる。周波数が高ければ高いほど測定器が高価になり、その精密な計測は専門家ですら困難なケースが多い。

本計測器の原理はつぎのものである。すなわち、外部から与えられて交流電圧の入力はアッテネータ

および1本の真空管(V1)によって適切なインピーダンスおよび信号レベルに変換された後、2本の真空管(V2、およびV3)による増幅回路を経て、検波器に送られる。検波器では交流信号を直流に変換し、アナログメータで入力信号の強さを表示する。さらに、検波後の直流信号をV2にフィードバックして負帰還回路をなし、真空管の交換による影響を無くそうとしている。

内部で使用する真空管は4本、図2のとおり、その内訳は6AU6(V1とV2)が2本、6U8(V3)が1本、電源部の整流管6X4の1本である。また、譲り受けた時点では、メータ指針が通電後フルスケールの1/5の位置を指し、ゼロから大きくずれていた。また感度が極端に低下していて、計測器としては正常に作動していなかった。

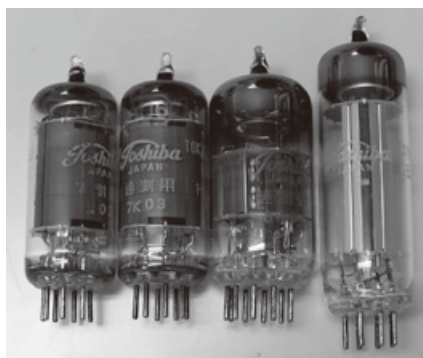


図2 搭載された4本の真空管

真空管はトランジスタと違って、寿命が短く、しかも徐々に性能が低下する。身近な参考例として、電球とLEDランプとの寿命・性能対比を考えるとわかりやすいかもしれない。そこで、以下の通り、4本の真空管を先に点検し、その他のパーツの点検交換、全体の調整作業をその後に行った。

1 真空管の点検

真空管は一般的に、ソケットといわれる取り付けパーツに挿して使用される。また、その使用寿命が短いということもあって、真空管をユーザが交換することを前提に設計・製造された電子機器がほとんどであった。対して、トランジスタは実用化された初期頃を除き、一般的に電子基板にハンダ付けされ使用される。交換はハンダ付け作業を伴うので概して難しい。ICになると、企業秘密とかも関連し、型番をわざと消したり、交換できないようにする動きま

で出てきている。

真空管の良否判定は一般的に、①所定の電圧をかけてプレート電流を測り、エミッションを知ること、②相互コンタクトンス(gm)を測ることで行う。ただし、gmの測定に専用の測定器が必要であったりするので、今回の点検ではプレート電流だけの測定にした。なお、許容範囲に関して、無線通信機械工業会によって1950年に制定させた「CES規格」によると、プレート電流は $\pm 25 \sim 30\%$ としている。

6AU6は多くのオーディオ機器や計測器に使われているシャープカutoff 5極管である。測定条件として、製造メーカの公開したデータシートによると、プレート電圧、スクリーングリッド(遮蔽格子)電圧をともに150V、コントロールグリッド(制御格子)電圧を-1V、カソード、サプレッサーグリッド(抑制格子)電圧をともに0Vにしたときに、プレート電流が10.5mAになる。実測したところ、2本の6AU6はプレート電流がそれぞれ、8.9mAと11.8mAであり、許容範囲内に収まっている。

6U8は3極管と5極管の複合管のひとつであり、ピン互換の真空管が多いことでも有名である。その一部を書くと、6AX8、6BL8、6EA8、6GH8、6GJ8、6HL8、6JW8、6KD8、6KE8、6LM8、6LN8、6LQ8、6LX8、6MU8、6MQ8、ロシアの6F1P、中国の6F1、6F2等となる。測定条件として、公開されたデータシートによると、3極部では、プレート電圧を125V、コントロールグリッド電圧を-1V、カソード電圧を0Vにしたときにプレート電流は13.5mAになる。また5極部では、プレート電圧、スクリーングリッド電圧をともに125V、コントロールグリッド電圧を-1V、カソード、サプレッサーグリッド電圧をともに0Vにしたときに、プレート電流が9.5mAになる。それにしただけで実測したところ、プレート電流は3極部では11.1mA、5極部では8.6mAであり、許容範囲内である。

以上で説明した簡易判定方法は専用の測定器がなくても行えるが、独立した電源を複数用意しなければならない。ヒータ電源以外に、3極管に対しては2台、5極管に対しては2~3台(プレート電圧とスクリーングリッド電圧を異にする場合は3台)、3極と5極の複合管に対しては2~5台になる具合である。また、プレート電圧は100~250Vと高くなることが多く、令和時代では手軽に用意できない

ことが欠点であろう。

6X4 は全波整流用整流管であるが、B 電圧を実測したところ、異常はみられなかったので、使用上問題なしと判断した。

なお、コントロールグリッドに電圧をかけた際に、フルスケールが $10 \mu\text{F}$ の高感度直流電流計（横河電機社製 2011-32）を用意し、コントロールグリッドに電流が流れていなかったことを点検時に合わせて確認した。

このように、4 本の真空管はいずれも使用上問題ないようである。真空管の使用寿命は数千時間程度といわれるが、使用状況によって大きく変わるのも事実である。数十年間も交換せず使用しつづけてきた真空管式ラジオは世の中に多く存在していることがその一例であろう。

2 その他のパーツの点検と交換

内部の抵抗器を個々に実測したところ、大きな値のズレはなく、取り替える必要はないと判断した。

コンデンサについては、直流抵抗が無限大になっていないもののうち、真空管との結合（カップリング）コンデンサを 2 つ（スペックはそれぞれ、オイルコンデンサ $1 \mu\text{F}/400\text{V}$ 、オイルコンデンサ $0.1 \mu\text{F}/400\text{V}$ ）を交換した。60 年代製造のコンデンサはサイズが大きく、これらがオイルを誘電体にしていて、リークしやすく劣化しやすい。リーク電流により、真空管のコントロールグリッド電圧が大きすぎたり、検波部にバイアス電圧がかかったりして、不具合の原因になっていた。一方、代替品である新しく製造されたフィルムコンデンサはサイズや、製造コスト、性能、寿命等のいずれの点も勝っている。

ほかのパーツ、たとえば、電源トランスや、メータ、スイッチ類等を点検したところ、異常を見つけることはできなかった。

3 調整と機能回復

2 つのコンデンサを交換して通電したところ、計測器が機能するようになった。さらに、マニュアルにしたがって調整したら、スペックとおりの機能を確認できた。

すなわち、線型性を確認するため、周波数が 1kHz である正弦波を入力させ、その実効値を 1.5V レンジのフルスケールである 1.5V から、 1.0V 、 0.5V 、

0.25V 、 0.1V 、 0.0V に変えながら、計測器のメータ表示を確かめた。大きなズレは見られなかった。

周波数特性について調べたところ、 750kHz の正弦波を入力に与えたら、約 1.4V との表示低下になったが、フルスケールである 1.5V に対する 10% 以内になっているので、出荷時スペックを満たしていると判断した。

50 年も昔に製造された電子計測器が若干の整備をするだけで機能回復したのは、たまたまの一例だけなのか、当時の日本製電子製品の質の高さによるものなのかはわからないが、いまの LSI 製品（スマートフォンやパソコン等）の修理可能な寿命に比べれば遥かに長いのは確かだろう。使用可能な寿命と修理可能な寿命、ユーザにとってどちらも大事なことであるが、電子デバイスの違いによって、あるいはその時代の電子産業の構造によって、大きく異なるのは現状であろう。

II 応用実験

電子デバイスの変遷や進化を確認するため、以下に示したとおり、一連の実験を行った。

1 使用可能な真空管の種類を増やす実験

製造中止により入手可能な真空管が限られていたり、手持ちの貴重な真空管を活用したりする等の理由で、本計測器で使用可能な真空管の種類を増やすことがユーザに歓迎されるはずである。無論、計測器の性能を落とさないことは前提である。

そこで、V2 である 6AU6 に対し、ソケットの 2 番目（サブレッサーグリッド）のピンが仮想 GND に繋いでいたが、そこをカットし、ソケットの 7 番目（カソード）に繋ぎなおす実験をした。その繋ぎなおす作業によって、サブレッサーグリッド電圧は仮想 GND に対して 0V ではなく、カソード電圧になる。

検証するために、さまざまな周波数および振幅の正弦波を生成して、基準となる交流電圧計（HP 社 3400A）と本計測器に分岐入力し、それぞれのメータの表示について比較確認を行ったところ、本実験前後における確度の変化は見られなかった。

本実験によって、V2 の真空管ソケットにピン互換の真空管がつぎのとおり大幅に増えた。6AG5、6AH6、6AJ5、6AK5、6AK6、6AN5、6AR5、6AS6、6AU6、6BA6、6BC5、6BD6、6BH6、

6BJ6、6BZ6、6CB6、6CE5、6CF6、6CG6、6CY5、6DC6、6DE6、6DK6、6DT6、6ES6、6ET6、6EW6、6GM6、6HZ6、6JL6、6JH6、ロシア・中国系の 6J1 (P)、6J2 (P)、6J3 (P)、6J4 (P)、6K4 (P)、6K5、6K7 等である。すべてが必ず使えるとは限らないが、使える可能性が大幅に高まった。60 年代当時では、性能が高くて安く仕入れられる真空管を選んで設計していたと思われるが、令和時代では性能が維持されて手に入りやすい長期ストック品や中古品、あるいは新品だがロシア・中国・東欧生産の互換品を選ばざるを得ない。

2 真空管の代替実験

真空管を寿命の長いシリコンダイオードや、トランジスタに置き換えるニーズは高いが、個々の真空管の役割や動作条件等を具体的に精査しなければならず、一律に代替する技術はまだ確立されていない。

そこで、電子回路を解析したうえ、計測器に搭載した真空管をつぎのように代替した。

(1) 整流管 6X4 をシリコンダイオードで代替

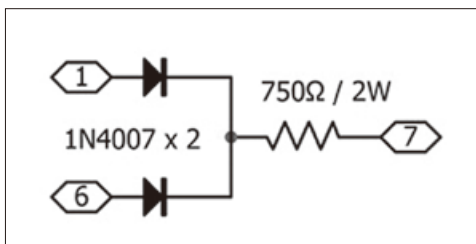


図 3 6X4 の代替回路 (番号は真空管のピン番号)

シリコンダイオードによる代替に 2 つの点に留意すべきである。1 つ目は 6X4 の電圧降下が十数 V になるが、シリコンダイオードは 1V 前後である。そこで、6X4 のカソードを流れる電流は約 14mA との実測値から 750 Ω の抵抗器を入れて電圧降下の値を 6X4 に合わせた。シリコンダイオードについては手に入りやすい 1N4007 にした。電子回路を図 3 に示す。

もうひとつの留意点はヒータ電圧の上昇である。シリコンダイオードによる代替回路にヒータ電源は必要としないので、負荷が軽くなる分、ヒータ電圧があがる。実測では代替によって、ヒータ電圧は 6.4V から 6.7V に変わった。

(2) 6AU6 を FET で代替

2 本の 6AU6 は異なる役割を果たしている。V1 は 3 極管接続によりカソードフォロワをなし、インピー

ダンスの変換を行っていて、カソード電流は実測で約 2mA である。V2 はカソード接地増幅回路をなしている、プレート電流は実測で約 0.55mA となる。

2 本とも動作電流が低いことから、高耐圧の FET を使えば、置換はそれほど難しくない。今回の実験ではドレイン・ソース間の電圧が最大 500V、許容損失が最大 0.74W となる LND150 を採用した。電子回路を図 4 に示す。

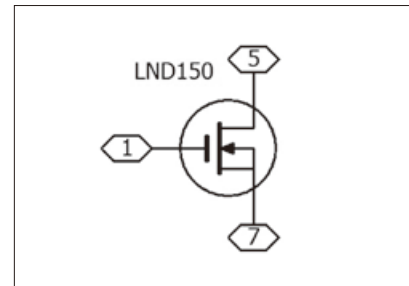


図 4 6AU6 の代替回路 (番号は真空管のピン番号)

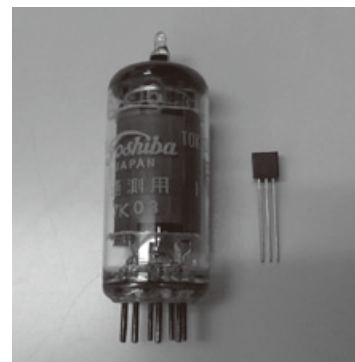


図 5 6AU6 と LND150

真空管 6AU6 と FET LND150 の実物写真を図 5 に示したが、それぞれの特徴と進化が外観からもよくわかる。真空管はサイズが大きく、ガラスに包まれることから機械的衝撃や振動に弱い。また、電子を飛ばすためにヒータを熱することが必要で、電力消費が大きい。対して、FET はサイズが小さく (極限まで小さくすれば、ひとつの LSI に数百万個も収納できる)、電子基板へのハンダ付けがしっかりしていれば機械的衝撃や振動に強く、ヒータが要らない分電力消費が少ない。ほかに、使用寿命や製造コストの違いも大きい。無論、FET に真空管にない欠点がないわけではなく、それぞれの時代に適したキーデバイスを完全に置き換えることはまだ難しい。

実装後の実測ではそれぞれのドレイン電流が 2.1mA、および 0.55mA であり、代替前の動作電流とあまり変わらない。

代替後、計測器としての感度調整をやらないといけないが、調整後の性能はヒータによるハムノイズがない分、15mV レンジでもハムノイズによる影響がほとんど無視できるようになった。なぜなら、入力をショートしたときに、メータ指針がゼロからほとんど動かなくなったからである。余談であるが、より古く設計製造され、より高性能なアメリカ・ヒューレットパッカード社 400 シリーズの一部では、ハムノイズに影響されやすい真空管に対して、交流ではなく、直流に整流して給電するといったヒータ電源の設計となっていて、いち早くハムノイズへの対策を講じていた。

代替後、さらに周波数特性も 1.1MHz まで改善された。1kHz に対し、確度が $\pm 10\%$ 以内に収まっているからである。

このように、デバイスの違いによる特徴をうまく活用すれば、計測器としての性能向上を図ることができる。

(3) 6U8 をトランジスタで代替

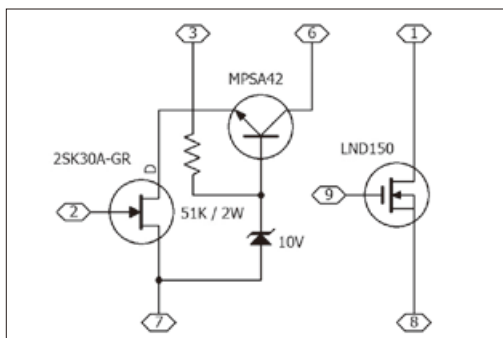


図 6 6U8 の代替回路 (番号は真空管のピン番号)

複合管である 6U8 は 5 極部ではカソード接地増幅回路をなし、3 極部ではカソードフォロワをなしている。カソード電流は実測では 5 極部が 8.6mA、3 極部が 2mA となっている。代替回路として、FET およびバイポーラトランジスタのコンビを設計し実装した (図 6)。また、実測では、2SK30A のドレイン電流は 1.7mA、抵抗 51kΩ を流れる電流は 2.7mA、LND150 のドレイン電流は 4.1mA となっている。

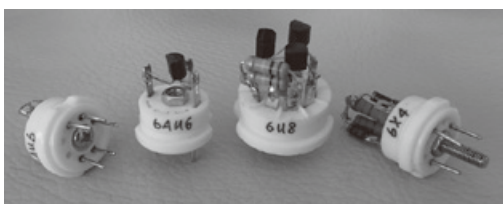


図 7 個々の真空管に対応する代替品

以上のように、個々の真空管をシリコンダイオードや FET、バイポーラトランジスタで代替することは可能であり、実際につくったものは図 7 に示した。それぞれを加工したソケットに実装し、真空管との差し替えがいつでも可能である。スペースの都合で詳細を割愛するが、装着時の安定化を図るために必要のない足 (ピン) を増やしたり、ソケットのセンターホールにネジを通して固定させたり、小型化するために抵抗の並列接続をしたりした工夫も考慮にいった。

すべての真空管を置き換えるなら、トランジスタ式や IC 式電子計測器に買い換えるべきだと思われる。真空管式の良さを残しつつ、一部だけを代用品にすることが望ましいかもしれない。いずれにしても、電子デバイスの代替は計測器資源の節約や、製品の使用寿命を伸ばすことに貢献することは間違いない。

3 簡易真空管チェッカーとしての使用実験

真空管 4 本のうち、V2 である 6AU6、V3 である 6U8 は不良になれば、感度が悪くなってメータ指針の表示が低下したり、周波数特性が悪くなったりする。その特徴を活用すれば、手持ちの真空管について、その良否を簡易的にチェックすることができる。

このことを数式で表現する。入力を v_i 、出力を v_o とし、真空管 V2 および V3 について、それらの g_m をそれぞれ g_2 と g_3 、負荷インピーダンスをそれぞれ z_2 と z_3 で表し、負帰還回路の帰還率を β とする。

真空管の特徴や本計測器の構成から、つぎのことはただちにわかる。すなわち、真空管 V2 の増幅度は $g_2 z_2$ であり、V3 のそれが $g_3 z_3$ である。出力と入力との間に以下の関係が成り立つ。

$$v_o = \frac{g_2 z_2 g_3 z_3}{1 + \beta g_2 z_2 g_3 z_3} v_i$$

真空管の相互コンダクタンス、たとえば、 g_2 が g_2' に低下したときに、出力 v_o が v_o' に変わったとすると、上式を利用して変換していけばつぎの関係式が得られる。

$$v_o' = \frac{v_o}{\frac{g_2'}{g_2} \left(1 - \beta \frac{v_o}{v_i}\right) + \beta \frac{v_o}{v_i}}$$

負帰還の性質から、 βv_o が v_i より小さく、 $1 - \beta \frac{v_o}{v_i}$ が常にゼロより大きいということにより、 g_2

が g_2 に低下したときに、そのときの出力 v'_o が必ず v_o より小さいことがこの関係式から直ちに導かれる。帰還率 β の存在により、 v'_o が $(g_2 - g'_2)$ (つまり g_2 の低下分) に比例して低下するわけではないが、確実に低下することは間違いない。

そういうことで、真空管 V2、V3 の交換によって相互コンダクタンス g_2 、 g_3 が変われば、その都度 β を調整することが本計測器の感度調整という作業の目的である。交換後の真空管は相互コンダクタンスが時間とともに低下し、メータ指針も連れて低下していく。真空管式計測器が定期的に校正しないといけいないのはそのためである。なお、真空管の相互コンダクタンスは値として、概ね 1 ~ 20mS の範囲内にあり、極端に大きいものは製造困難であった。バイポーラトランジスタの増幅率が品種によって互いに何千倍も異なることと対照的である。

実験的に、任意波形信号発生器 (FeelTech 社 FY6600-60M) を計測器の入力につなぎ、エミッションが低下してしまった真空管を複数、V2 または V3 のソケットに挿し込み、メータ指針の表示を確認してみた。周波数が 1kHz である正弦波に対して指針がフルスケールになっても、周波数を 300kHz にあげると指針が 20% 以上減少してしまった。あるいは、周波数が 1kHz でさえもフルスケールに指さなくなった。ただし、本簡易チェックに合格したとしても、不良の可能性を完全に否定するものではない。また、図 8 のように、延長コードやソケットを加工・作成すれば、ピン配置の異なる真空管であっても、機能が似ていればチェックすることが可能になる。

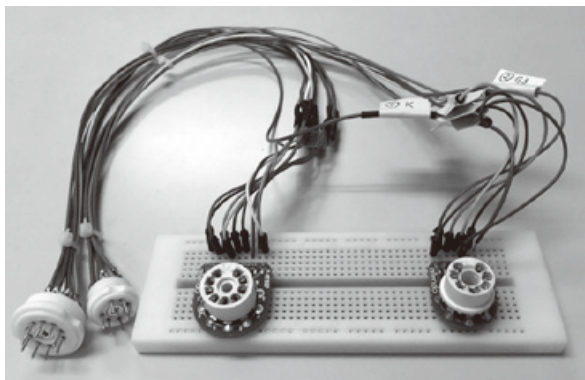


図 8 ピン配置の異なる真空管でもチェック可能

本計測器は構造上、入力に音源、出力にミニアンプを繋げば、高感度オーディオ・プリアンプにもなり、音楽による試聴で真空管の良否判定も可能である。

終わりに

本文では真空管式交流電圧計の機能修復、およびその後の一連の応用実験を通じて、それぞれの真空管の働きを他の真空管で代替する実験や、トランジスタ回路による代替実験等を考案して、いままでの電子デバイスの主役であった真空管やトランジスタの特徴と進化を確認した。技術立国、ものづくり大国でありつづけるには、従来の技術を継承・発展していくことが不可欠である。そのために、従来の電子キーデバイスを理論と実践の両面から正しく使いこなすことが要請される。

参考文献

- 一木吉典 (1961) 『全日本真空管マニュアル』 ラジオ技術社
- 菊水電子工業 (1967)、『高感度真空管電圧計 161A 型 取扱説明書』
- 丹野頼元 (1974) 『森北電気工学シリーズ 2 電子回路』 森北出版

Characteristics and Evolution of Electronic Devices: Through Functional Restoration and Application Experiments of a Vacuum Tube Electronic Measuring Instrument

NI Yongmao

Abstract

This article examines the characteristics and evolution of vacuum tubes and transistors through specific devices, taking an example of electronic measuring instruments. In other words, the features and differences of individual electronic devices are analyzed through the functional repair of a vacuum tube electronic measuring instrument, the 161A AC voltmeter manufactured by Kikusui Electronics Corporation, and a series of subsequent application experiments. In order to pass on the know-how necessary for the practice of electronic engineering, which has been regarded as important in Japan as part of manufacturing, it will be necessary to have ideas that are not written in textbooks and knowledge and wisdom that matches today's IT society.

(2021年5月31日受理)