

5極管でも発振する

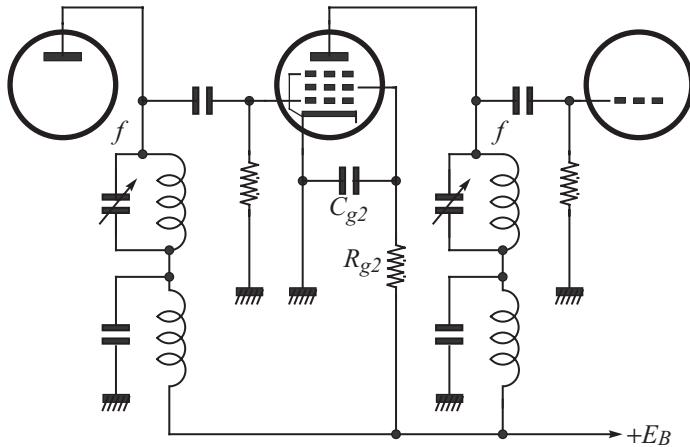
——迷信ア・ラ・カルト——

世の中にはいろいろな迷信がありますが、それはそれなりに一応の理由が考えられるものもあれば、そうでないものもあるようです。なかには、それができた時代には真実であったが、その後の進歩発達によって全くナンセンスになってしまい、それだけが迷信という形で残されたものもあるのです。たとえば、今どき“6球のラジオより8球のほうがよい……”ということをついたとしたらどう思われるでしょう。“球にもいろいろござんす。複合管は何本にかぞえるんでござんすか”などはまだ初歩のうち、“受信方式はスーパとして考えるのですか、球の g_m は……”などというウルサイ反発がでてくるのではないのでしょうか？

ところが、このような迷信は、真空管ができた初期のころは、受信方式はオートダイナ方式であり球が1本多ければ、それが高周波増幅であろうと低周波増幅であろうと高級品とされていたのです。ですから、その時代は真実であり、迷信ではなかったのです。

ところが、現在の世の中にこの迷信が再び生れ変っているのだから面白いではありませんか。すなわち、トランジスタ・ラジオがそれなのです。6石よりも7石、7石よりも8石と、しまいには、各メーカーの技術者は、いかにして無害な回路を作って石を1石でも余分につけるかと頭をなやましておるときいています。迷信とはこのような恐ろしさがあるのです。しかし、わたくしたちは、それに迷わされることなく、常に正しい判断をしていきたいものです。以下、身近な問題から取り上げてみましょう。

よく通信形受信機を製作・調整された方々から、IF 2段増幅にすると発振してしまつて困りますということを目にします。中間周波増幅ですから、まさか三極管を用いるわけではないはずですが。配置や配線に誤りもなく、シールドも完全にしたのに自励発振が起きるのはなぜでしょうか。また、毎号の製作記事にもあるように、わたくしたちは6AR5などの五極管や6AQ5などのビーム四極管を送信機に使っています。しかし、これらの真空管を第1.1図のようにストレートの増幅器で用いますと必ず自励発振が起きてしまいます。これはいったいなぜなの



第 1.1 図 五極管による高周波電力増幅回路

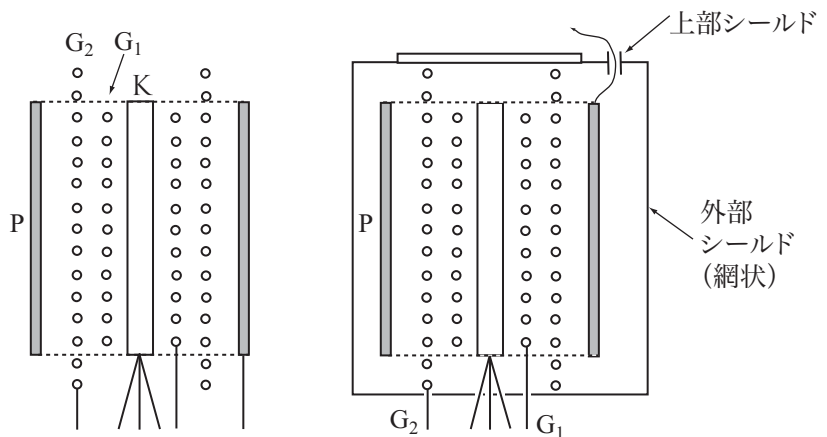
でしょうか。工業高校や大学の教科書には、「三極管はグリッドとプレート間の電極間容量が多いために高周波増幅をしようとするすると、その容量を通して正帰還がかかって発振する。これを防ぐために四極管が発明されグリッドとプレート間を高周波的にシールドするスクリーン・グリッドを挿入した……」と明記してあります。これは迷信なのでしょうか。進んだ学習としてさらに詳しく調べてみましょう。

1906年迄ド・フォレーによって発明された三極管は、初めは1904年にフレミングが発明した二極管の特許のがれのために、プレートとカソードとの間に1個の電極を挿入したものにすぎませんでした。しかし、ダイオードからトランジスタが生れたときと同様に種々の働きをすることがわかり、増幅、発振、継電という技術が急激に進歩してきたのです。ところが、前にも述べたように、グリッド・プレート間の電極間容量(C_{gp})があるために、当時は数Mc止りであった短波帯においては中和回路を使用しても増幅困難という現象があらわれ、一つの壁にぶつかったのです。(もう一つの壁は、いかにしてプレート電圧を低くして動作させるかという問題で、これはスペース・チャージ四極管により解決しました)。

この壁を破るためには、じやまな C_{gp} を取り除きたいわけですが、プレートやグリッドを取り除くわけにもいかないし、距離をうんと離すわけにもいかないので、その間にもう一つのグリッドを入れて静電遮蔽^{しやへい}をしてしまおうということが考えられました。このような考え方は1916年ショットキーが提案したのですが、具体的な形になって現われたのは1926年にハル(A. W. Hull)が作った四極管だったのです。スクリーン・グリッドのスクリーンはご承知のように幕という意味で、本来のシールドという点からみれば完全な金属板を入れてしまえばよいわけです。しかし、これではカソードからの電子流がプレートにとどかなくなるの

で、やむを得ずグリッド構造としたのです。このようにグリッド構造にしたとしても、それを直接アースしてしまったのでは、シールド効果はありますが、電子流をプレートに加速させるための電界もシールドされてしまいます。そこで、高周波的にはアースにおとし、プレートからの電界をカソードにまで延長するために、プレート電圧の約 $\frac{1}{2}$ の直流電圧を加えて電子流を加速させたのです。高周波的には零電位であり、直流的には正電位であるということは、言葉でいえば難かしく感じますが、コンデンサのリアクタンスが周波数に逆比例して減少するという性質を思い出してもらえばよいわけです。第1.1図の C_{g2} と R_{g2} がそれで、回路としてはあまりにも見慣れたものですが各部品のもつ物理的な意味をよく考えておいてください。繰り返していいますが、スクリーン・グリッドには二つの役目があることを強調しておきます。その一つはシールド作用であり、この効果が発揮できるかどうかは、真空管内部のシールド作用がうまくできているかどうかということと外部につけるバイパス・コンデンサ C_{g2} が最短距離でそのカソードに落ちているか、また、 C_{g2} が使用する周波数でじゅうぶんなバイパス能力をもっているかによって決まります。他の一つは、電子流の加速作用であり、その真空管の特性によって規定された直流電圧を与えない限り、じゅうぶんな動作を望むことはできないのです。

まず、シールドということから調べてみますと、これはかなり面倒な問題であることはすでにご承知と思います。しかも、それが受信管を例にとれば5mm以下の距離において、いうならばスキマだらけなグリッド線で行なうのですから、 $C_{pg} = 0.01\text{pF}$



(a) G_2 を他の電極より長くしてシールド効果をよくする

(b) プレートを内外から包む

第1.2図 スクリーニンググリッド管の電極構造

とはなみ大抵の努力ではありません。第1.2図はスクリーン・グリッド四極管の代表的な構造を示したもので、(a)はコントロール・グリッド(G_1)とプレート(P)の間に置いたスクリーン・グリッドの長さを他の電極より長目にしてシールド

ド作用をもたせてあります。(b)は、さらにシールド作用を完全にするために、(a)と同様に G_2 を長くすると同時にPの上部、下部および外側にシールドをつけP電極をすっぽりと包むようにしたものです。これらの構造は、五極管になってからもそのまま続けられ、 G_2 とPとの間に G_3 (サプレッサ・グリッド)を入れた(a)の構造が6AU6、6BA6などに見られます。また、(b)は主として高 g_m 管の構造で6BX6がこの代表といえましょう。

しかし、このようなシールドをかなり嚴重にしても C_{gp} を零にすることはできず6BX6でも0.008pFという有限な値になっています。このために、グリッドおよびプレートの両方に同調回路をもつA級増幅——たとえば中間周波増幅回路——でも負荷抵抗が高くなると、いくら完全な配置・配線や外部シールドをつけても発振してしまうことになるのです。この問題の詳細は後で説明します。

さて、次は、加速グリッドという点から眺めますと、第1の目的がシールドということもからみ合せて G_1 のグリッドの目とだいたい似たようなピッチにしたいところです。しかし、これでは、カソードからの電子流を加速すると同時に、 G_2 を通過させてプレートに電子流を送り込むという第2の目的からはかなりはずれてしまうのです。特に、動特性でプレート電圧が瞬間的に下がったときには、大部分の電子流が G_2 に流れ込んでしまいます。四極管や五極管の G_2 電流がP電流の $\frac{1}{3}$ 程度になっているのはこのためで、しかも、流入した電子は G_2 で全部熱になってしまいますから、 G_2 の許容電力を無視することはできないのです。

このような傾向は、五極管になって G_3 を挿入することにより一層ひどくなりました。したがって、6BD6などの電圧増幅管ではさほど問題にならなかった G_2 電流も42とか6F6などの電力増幅管では、これをどのようにして減らすかということが真空管メーカーの最も苦心したところでした。一方、大電力の低周波電力増幅管の要求は日増に強くなり、1936年に6L6でおなじみのビーム管が出現したわけです。ご承知のように、この真空管は G_1 と G_2 とのピッチを同一にすることによって G_2 に流入する電流の減少を計るとともに、 G_2 とPとの距離を適当に離すことによって仮想の G_3 電極を電子流自身によって作らせたものなのです。

ここで、再び G_2 電極について考えてみますと、低周波の電力増幅という開発目的のために、その本来の目的であるシールド作用ということは無視され、専ら加

第 1.1 表 真空管の C_{gp}

真空管名	C_{gp}	真空管名	C_{gp}	真空管名	C_{gp}
6AQ5	0.35pF	2E24	0.11pF	815	0.2pF
6BQ5	0.5	2E26	0.2	6146	0.24
6L6	0.9	6360	0.1	807	0.2
6V6	0.3	832A	0.07	829B	0.12

速電極としての作用だけが重要視されたのです。したがって、その C_{gp} は、**第 1.1 表**のように受信管では 0.3~1pF 程度、送信管でも 0.07~0.3pF という値になっているのです。

ビーム管のこのような考え方は、再び五極管にも応用され、5763($C_{gp} = 0.3\text{pF}$) や、わが国で開発された 3P50, 4P60…などの P シリーズが誕生したのです。もちろん、低周波用としての 6L6 から、高周波用としての 807 が生まれるときには、リードの引出し方などを用いたシールドなどをつけたのですが、本命のスクリーン・グリッド管の C_{gp} とは少なくとも 1桁は異なっていることに注意してください。

三極管の場合は、電子流をコントロールする電極はグリッドでしたが、それ以上複雑な構造をもつ多極管では、最もカソードに近いグリッドからプレート側に向かって第 1, 第 2, 第 3 グリッドというように番号でグリッドの名称にする場合と、コントロール(制御)・グリッド, スクリーン(遮蔽)・グリッド, サプレッサ(抑制)・グリッドとそのグリッドの能力を名称にする場合があります。後者の呼び方に従う場合には、6BD6 や 6AU6 などの第 2 グリッドはスクリーン・グリッドで、全体として厳密な呼び方をすればスクリーン・グリッド五極管といわなければなりません。(四極管が実用されだしたころには、スペースチャージ・グリッド四極管があり、きちんと区別されていました)。

これに対して、前に調べた 6AR5 や 5763 などの第 2 グリッドはアクセラレイト(加速)電極ですから加速グリッド五極管とでもいったらわかりやすいのではないかと思います。しかし、これらの真空管は大部分が低周波電力増幅管ですので、しいてそのような名称をつけないのが普通なのです。そして、加速グリッドとその性能が変わっても、一般には昔ながらのスクリーン・グリッドという名称を使っているのです。その上、悪いことには、学校ではここまで詳しく調べる時間的余裕がないため、“ビーム管や五極管だから中和回路はいらないはず”という迷信が出てくるのです。

こう考えてきますと、“なるほど、同じ五極管でもスクリーン・グリッド管と加速グリッド五極管の違いはよくわかったが、最初にいった中間周波 2 段増幅の発振はどうしてくれるのだ。この場合はスクリーン・グリッド五極管をちゃんと使っているぞ”ということと、“加速グリッド五極管を使っているが私の送信機ではあまり自励発振は起きていない。必ず発振するというのはお前の作り方がまずいのではないが”というご質問が出てくると思います。このような現象はどうしたものでしょうか。次にこれらについて回路側から調べてみましょう。

それでは、先程宿題にしておいた中間周波増幅器の発振から考えてみましょう。工業高等学校の「電子回路」で学ぶように、五極管で増幅するときの増幅度〔 A 〕倍は、その真空管の相互コンダクタンスを g_m 〔 μ または、 A/V 〕、負荷抵抗を R_L 〔 Ω 〕とすれば、

$$A = g_m \cdot R_L \quad (1.1)$$

で表わされます。この負荷抵抗は、低周波増幅の場合は抵抗、チョーク・コイルのその周波数におけるリアクタンスなどで表わされ、高周波増幅の場合にはプレート側の同調回路の共振時インピーダンスになります。(1.1)式から考えられることは、 g_m または R_L を大きくすれば、それに比例して A はいくらでも大きくできるはずですが、しかし、真空管の g_m はわれわれが任意の値に選ぶわけにはいきませんから、 A を大きくするためには R_L を大きくしなければなりません。

しかし、 R_L が抵抗の場合には、その値を大きくすればするほどプレート電圧が低下し、それにつれて g_m も減少してしまいます。 R_L がチョークの場合は、直流抵抗が少ないので抵抗のときより大きな値がとれますが、インダクタンスを増すと同時に分布容量や直流抵抗も増してきますので、やはり A を無限に大きくすることはできません。

高周波（含中間周波）になりますと、どうしても共振回路を使わなければなりませんので、 R_L には並列共振回路が用いられます。ある周波数 f に同調するコイルのインダクタンス L とコンデンサの容量 C との関係は

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.2)$$

で表わされますから、 L を大きくして C を小さくしても逆に L を小さくして C を大きくしても同調できるという点には変りはありません。しかし、負荷抵抗として考えるときは、共振時のインピーダンス（共振時には同調回路は純抵抗になりますからインピーダンスという言葉は適当でないかも知れませんが、この名称が使われています）の大きさ（ $\frac{L}{CR}$ 、 R はコイルの高周波抵抗）が問題になります。つまり、 L を大きくして C を小さくするほど（これをハイ L 回路といい、逆の場合をハイ C 回路という） R_L は大きくなるのです。ただし、チョーク・コイルと同じように、 L を大きくするために巻線の回数だけ増したのでは R も大きくなってしまいますので、限度はあります。

それでは、圧粉心を用いるとか、電線の太さを太くするとかという方法をとれば(1.1)式の A をかなりのところまで大きくできるのでしょうか。ここに、もう一つの限界があるのです。これが C_{gp} のいたずらで、0.01pF の容量であっても、

真空管の g_m が大きいほど、また、 R_L が大きいほど正帰還が大きくなって発振してしまうのです。そして、安定に増幅できるための R_L の限界は

$$R_L \leq \sqrt{\frac{\alpha_n}{2\pi f C_{gp} g_m}} \quad (1.3)$$

であるということが発表されています。ここで、 α_n は増幅段数に関係のある係数で、1段増幅の場合は、 $\alpha_n = 2$ 、2段増幅の場合は $\alpha_n = 0.97$ となります。(たとえば、屋代包雄『受信管の規格と使い方』、オーム社、昭38)。

たとえば、IF2段増幅の場合、6BD6を使うとすれば、 $C_{gp} = 0.005\text{pF}$ 、 $g_m = 2\text{m}\Omega$ ですから (1.3) 式によって R_L の上限を求めますと、 $f_i = 455\text{kc}$ として

$$R_L = \sqrt{\frac{0.97}{2 \times 3.14 \times 455 \times 10^3 \times 0.005 \times 10^{-12} \times 2 \times 10^{-3}}} \doteq 260\text{k}\Omega$$

という答が得られました。いま、共振回路の Q を 80 としますと、

$$R_L = \frac{L}{CR} = \omega L Q = \frac{Q}{\omega C} \quad (1.4)$$

の関係を用いて

$$L = \frac{260 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 455 \times 10^3 \times 80} \doteq 1.14\text{mH}$$

$$C = \frac{80}{2 \times 3.14 \times 455 \times 10^3 \times 260 \times 10^3} \doteq 108\text{pF}$$

ということになりますので、同調コンデンサが 108pF より大きい共振回路 (共振時インピーダンスが 260k Ω より小さい回路) をもつ IFT を用いなければ発振してしまうのです。市販されている 2段増幅用 IFT の同調コンデンサが 200~300pF を使っているのはこのためです。一方、発振を気にするあまり、 C を大きくしすぎますと (1.1) 式より R_L が下がり A も低下します。

(1.1) 式に (1.3) 式の関係を用いますと

$$A \leq g_m R_L = g_m \sqrt{\frac{\alpha_n}{2\pi f C_{gp} g_m}} = \sqrt{\frac{\alpha_n g_m}{2\pi f C_{gp}}} \quad (1.5)$$

ここで、中間周波数 f および増幅段数は設計時に一定の値になりますから、それを定数 $K \left(= \sqrt{\frac{\alpha_n}{2\pi f}} \right)$ とおきますと、上式は

$$A \leq K \sqrt{\frac{g_m}{C_{gp}}} \quad (1.6)$$

第 1.2 表 代表的な高周波増幅用五極管

真空管名	g_m [m Ω]	C_{gp} [pF]	$\frac{g_m}{C_{gp}}$	真空管名	g_m [m Ω]	C_{gp} [pF]	$\frac{g_m}{C_{gp}}$
6AG5	5.0	0.03	167	6BX6	6.8	0.007	970
6AK5	5.1	0.02	255	6BZ6	6.1	0.02	305
6AU6A	5.2	0.0035	1485	6CB6	6.2	0.02	315
6U8A	5.2	0.01	520	6DK6	9.8	0.02	490
6BA6	4.4	0.0035	1255	6EH7	12.5	0.005	2500
6BD6	2.0	0.005	400	6EJ7	1.5	0.005	3000
6BH6	4.6	0.0035	1315	6FG5	9.5	0.02	475
6BJ6	3.8	0.0035	1085	6FS5	10.0	0.03	333
6BL8	6.2	0.025	248

という形になり、 A を大きくとるためには $\frac{g_m}{C_{gp}}$ がよい目安になることがわかりましよう。第 1.2 表に代表的な高周波増幅用五極管の g_m , C_{gp} および $\frac{g_m}{C_{gp}}$ を示しておきます。これをみますと、高周波増幅管として初期に開発された 6AG5 や 6AK5 よりも 6AU6, 6BA6, 6BJ6, 6EH7 などのほうが使いやすい（発振しにくい）ことがわかります。6BA6 の C_{gp} は 0.0035pF とずいぶん小さい値ですが、50Mc でのリアクタンスは約 900k Ω となりだいたい内部抵抗と等しくなります。零でない数字ほど恐ろしいものはありません。

次に、送信機における自励発振について調べてみましょう。前にも調べたように、スクリーン・グリッド五極管でも C_{gp} が有限の値をもっているために、 A を上げようとして R_L を大きくすると発振してしまったのです。まして、加速グリッド五極管や四極管の C_{gp} は前者に比べて第 1.1 表のように約 1 桁大きいわけですから、たとえば、6AR5 を VFO の発振管の後に用い A 級増幅を行なわせるとしますと、 $C_{gp} = 0.5\text{pF}$, $g_m = 2.3\text{m}\Omega$ ですから、発振しないための R_L の限度は、(1.3) 式より $f = 3.5\text{Mc}$ として

$$R_L \leq \sqrt{\frac{2}{2 \times 3.14 \times 3.5 \times 10^6 \times 0.5 \times 10^{-12} \times 2.3 \times 10^{-3}}} \doteq 8.9\text{k}\Omega$$

ということになります。そして、6AR5 の次段に C 級増幅をつけることを考慮して、共振回路の Q を 20 と仮定しますと (1.4) 式より

$$L = \frac{R_L}{\omega Q} = \frac{8.9 \times 10^3}{2 \times 3.14 \times 3.5 \times 10^6 \times 20} \doteq 20.24\mu\text{H}$$

$$C = \frac{Q}{\omega R_L} = \frac{20}{2 \times 3.14 \times 3.5 \times 10^6 \times 8.9 \times 10^3} \doteq 102.4\text{pF}$$

が限度となりますので、安全をみれば 150pF 以上の同調容量を用いた共振回路が必要であるということがわかります。

しかし、電話送信機の場合は、たとえ中間段や終段が多少発振していても、前段から強い励振をかけてしまいますので、自励発振の周波数が励振周波数に引き込まれてしまうことが多いのです。それに、C 級増幅の場合は、プレート電流はパルス状になり g_m の平均値は A 級より下がります。また、バイアス電源を用いてグリッドを負におさえた状態では自励発振は起きないのです。したがって、自励発振は起きているのだがそれを発見できないという状態と考えると間違いありません。

最近では、SSB もかなりハム局で使われるようになりました。この場合は、すべてのステージを、A 級～AB1 級で用いますので、今まで気の付かなかった五極管やビーム管も中和をとらなければならなくなってきたのです。特に、A3 送信機で終段にプレート（またはプレート・スクリーン同時）変調をかける場合は、変調のピークで自励発振が現われ、見掛けの変調度は浅いくせにサイドだけバリバリと広がるという現象が起こるのです。じゅうぶんの注意が必要です。

(CQ ham radio 編集部)

PDF 化にあたって

本PDF は、
『CQ ham radio』1966年11月号所収
を元に作成したものである。

ラジオ関係の古典的な書籍及び雑誌のいくつかを

ラジオ温故知新

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/>

に、

ラジオの回路図を

ラジオ回路図博物館

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/radio/radio-circuit.html>

に収録してあります。