

真空管の動特性曲線の解析

- 平均プレート電流の不思議 -

木下 順二

はじめに

歴史は繰り返すといいますが、最近また管球アンプに興味を持つ人が増えてきて、自作するマニアも多くなっているそうです。管球アンプの設計法について書かれた本も、続々と復刊され、管球アンプは新しい時代を迎えているといつてよいでしょう。にもかかわらず、雑誌の製作記事を見ますと、その設計法は旧態依然としたものが多いようです。1960年代までの設計理論が、はたして今でも最善なのか疑問です。確かに設計には、勘と経験によらなければならないところもあるでしょうが、もう少し論理的かつ現代的な手法を取入れられないものかと感じます。

話は変わりますが、現在続々と生産されているメーカー製のアンプには、測定データが発表されています。しかし、いまどき周波数特性や歪率特性のデータを見て、アンプを買う人なんていないでしょう。それは、その種のデータが決してアンプの音質や性能を表していないからで、同じ理由から自作マニアの中には、テスター一つでアンプを作れると主張する人もいます。しかし、私はこのような測定データを全く否定する態度は好きではありません。そういうデータでも、不完全とはいえ無意味ではないからで、従来のように出力レベルの周波数特性や、全高調波歪率だけでなく、もっと詳しい測定を行うべきなのです。この周波数特性と入出力特性（歪率だけでなく広い意味で）の両者を詳しく解析するだけで、測定データと聴感の関係も出てきて、オーディオ機器の性能はかなりよく判断できる、というのが私の考えです。

最近、単発サイン波によるスピーカーの特性測定が話題となっていますが、これは過渡特性を調べるとともに、周波数特性をレベルだけでなく、位相特性まで含めて測定することに相当しています。スピーカーのように位相特性の複雑なものでは、極めて重要なデータが今まで見過ごされていたわけです。アンプの場合にも、NFBをかけたときの動作の安定性という点からは、位相の周波数特性が問題になることがあるでしょう。

歪率特性に関しても、単に歪の大きさだけでなく、成分を分析して比較しなければ意味がありません。これは、次数によって人間の検知限界が大きく異なるため、昔のオルソンの時代からよく知られていることです。昔の話と言えば、「3極管か5極管か」という論争がありました。これと全く同じことが、今の真空管とトランジスターにも言えるわけで、真空管がトランジスターに比べて優れている点として、第1にあげられるのは、「歪が発生しても低次の高調波成分が中心である」ということでしょう。トランジスターの歪は高次の成分が多く、従って強度のNFBをかけるのが常識です。これに対して、真空管、特に3極管は、2次歪が主体であるため、歪が耳につきにくいと言われます。ただ、残念ながら今の管球アンプでは、設計の段階で歪の成分をコントロールしているものはほとんど見あたりません。経験則か試行錯誤による設計にとどまっています。

この記事の目的は、アンプの入出力特性に着目し、管球アンプの歪を、設計の段階でコントロールするための考え方を述べることにあります。内容があまり難解にならないよう、実用的な式や数値を含むものにしたいと思っていますが...

1. 平均プレート電流の不思議

まず手始めに、真空管の動特性曲線に関する話題を考えてみましょう。管球アンプの設計法について書かれた本の中には、プッシュプル出力段の平均プレート電流を求める式として、(1)式が使われているものが多いようです。これに対して、M誌1990年7月号のQ&Aで、宮崎氏が、「2次歪を考えると(1)式の係数を0.3に修正する方がよい」、と述べられています。また、長真弓氏の『真空管アンプ設計自由自在』でも、同じように全ての係数を0.3にした式が使われています。

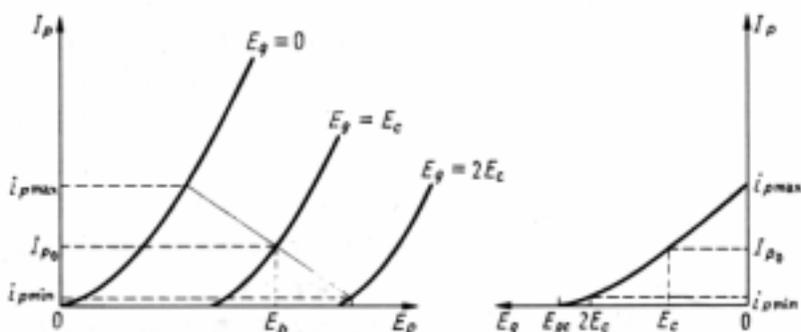
$$\bar{I}_p = \frac{1}{\pi} \left\{ (\pi - 2)I_{p0} + i_{p\max} + i_{p\min} \right\} \quad \dots(1)$$

この式はあまり正確ではないということのようですが、そもそもこの式は、どこから出てきたのでしょうか。実は後で詳しく述べますが、この式は動特性曲線を折れ線近似するという、大胆かついいかげん(!)な手法によって導かれたもので、元の本には断わってあるはずですが、あまり信用するのは考えものです。実際、これでは管球アンプの持つ特質である

ところの、「低次の歪」が表現できません。この問題に関しては、要するに従来の設計書もたいしたことはなく（失礼！）、もう一度新鮮な目でアンプの設計法を見直した方がよいと思われます。従来のアンプの設計法では、周波数特性の問題が中心に述べられていて、入出力特性、特に歪の成分の問題などは、ほとんど言及されていません。現代的な管球アンプでは、もう少しこの点に注意を払う必要があると思います。

2. 動特性曲線と動作階級

アンプの設計、特に出力段の設計をするに当たっては、動特性曲線を使うのが便利です。普通、真空管の特性曲線といえば、 E_p-I_p 特性曲線のことをいいますが、これは、最大出力などを見積もるには便利なのですが、入出力の関係、特に歪の様子などを調べるには不向きです。そのような用途には、 E_g-I_p 曲線を用い、さらに負荷抵抗を接続した場合のグラフを動特性曲線と呼びます。この動特性曲線が正確に与えられれば、アンプの歪特性はたちどころに（と言うほどでもないですが）計算することができます。それほど重要なものであるにも関わらず、今までアンプの設計記事でお目にかかったことがないのは不思議と言うほかありません。たぶんそれは、作図するのが面倒だからだと思われるので、まず E_p-I_p 曲線しか与えられていない場合、どのようにして動特性曲線を作図するかを説明しましょう。

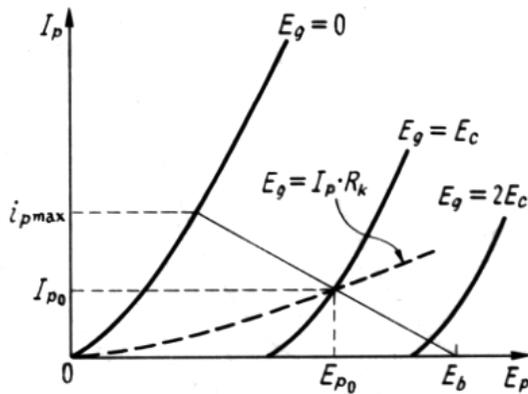


【図1】 (a) E_p-I_p 特性曲線 (b) 動特性曲線

シングル動作の出力段を例にして説明します。図1 a のように、 E_p-I_p 曲線上にロードラインを引きます。供給電圧を E_b 、バイアス電圧を E_c とすれば、 $E_p=E_b$ 、 $E_g=E_c$ の点から、 $\Delta E_p = -R_L \Delta I_p$ を満たすような直線を引くと、それがロードラインとなります。入力電圧が変化したとき、この真空

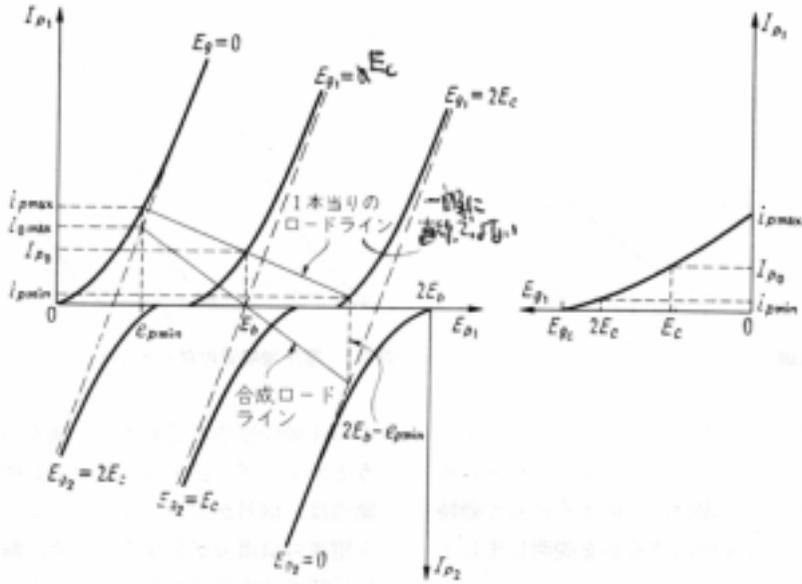
管の動作点は、ロードライン上を移動することになります。ロードラインを E_g-I_p 曲線上に移すには、ロードラインが、もとの E_p-I_p 曲線と交わっている点を読み、 E_g-I_p グラフに書き込んで行きます（図1b）。この際重要なのは、 $E_g=0$ 、 E_c 、 $2E_c$ の3点です。入力電圧が加えられたとき、動作点はこの範囲を動きます。

ところで電圧増幅管の場合には、動作原点を決めるのに、負荷抵抗による電圧降下を考えなければなりません。出力管の場合には、出力トランスがつながるので特別だったわけです。電圧増幅管の場合には、図2のように、 $E_p=E_b$ 、 $I_p=0$ の点からロード



【図2】 電圧増幅管のロードライン

インを引き、 $E_g=E_c$ の曲線と交わる点が、動作原点となります。カソードバイアスの場合には、カソード抵抗を R_k として、 E_p-I_p 曲線上に、 $E_g=R_k I_p$ を満たすように点を取り、ロードラインと交わるところを動作原点と定めます。実をいうとカソードバイアスのときの動作原点は、信号が大きくなるとプレート電流の直流分が変化するため、無信号時の動作原点からずれてしまいます。この問題はちょっと複雑なので、別の機会に詳しく述べることにして、今回は固定バイアスに話を限定します。



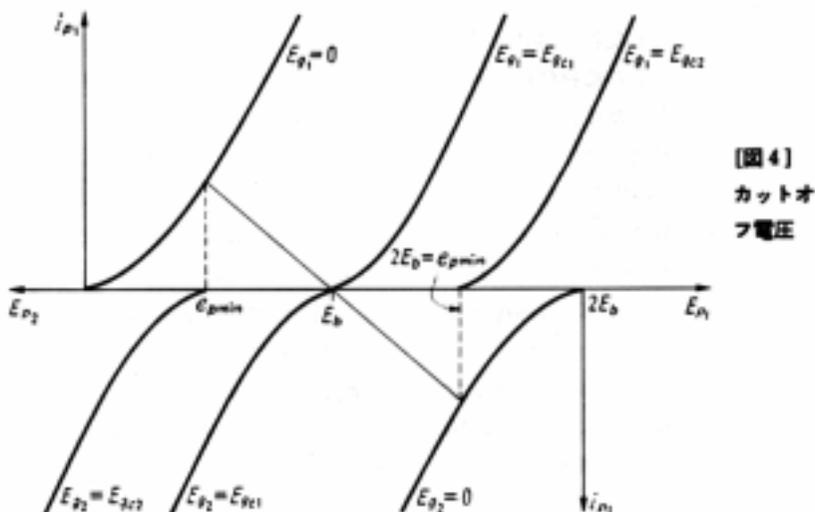
【図3】 (a) プッシュプル動作のロードライン (b) 動特性曲線

次にプッシュプル動作の出力段を考えてみましょう。プッシュプル動作の場合には、特性曲線を合成しなければなりません。供給電圧を E_b 、バイアス電圧を E_c とすれば、 $E_p = E_b$ 、 $I_p = 0$ のところで、特性曲線を反転して張り合わせ、その点を通るように、 $R_L/4$ の負荷抵抗に対するロードラインを引きます（図3 a）。また、バイアス電圧の和が、 $E_{g1} + E_{g2} = 2E_c$ のように一定になる2本の特性曲線を平均し（図の中で点線で表示）、特に $E_{g1} = 0$ 、 $E_{g2} = 2E_c$ の合成曲線とロードラインとの交点を、 e_{pmin} 、 i_{omax} とします。 $E_{p1} = e_{pmin}$ のところ、もとの $E_{g1} = 0$ の特性曲線の I_{p1} を読み、 i_{pmax} とします。これが、1本あたりの最大プレート電流となります。

次に $E_{p1} = E_b$ のところでのもとの $E_{g1} = E_c$ の特性曲線の I_{p1} を読み、 I_{p0} とします。これが0信号時のプレート電流です。 $E_{p1} = 2E_c - e_{pmin}$ のところで、 $E_{g1} = 2E_c$ の曲線の I_{p1} を読めば、 i_{pmin} が定まります。この3点を、 $E_g - I_p$ 曲線に移したのが、図3 bです。いま、 $E_{g1} < 2E_c$ でプレート電流がカットオフするように考えました。このときの、 E_{g1} をカットオフ電圧 E_{gc} と呼ぶことにしましょう。

ここで、プッシュプル動作における E_{gc} の意味を考えてみます。普通、A級とB級の違いは、1サイクルの間にプレート電流が0になる（カットオ

フする) 区間があるかどうかで区別します。この区別は、同じ真空管であっても、プレート供給電圧と、負荷抵抗の選び方によって、さまざまであり、1 サイクルの間に部分的にカットオフする A B 級の動作点は、常に存在するとは限りません。図 4 を見て下さい。



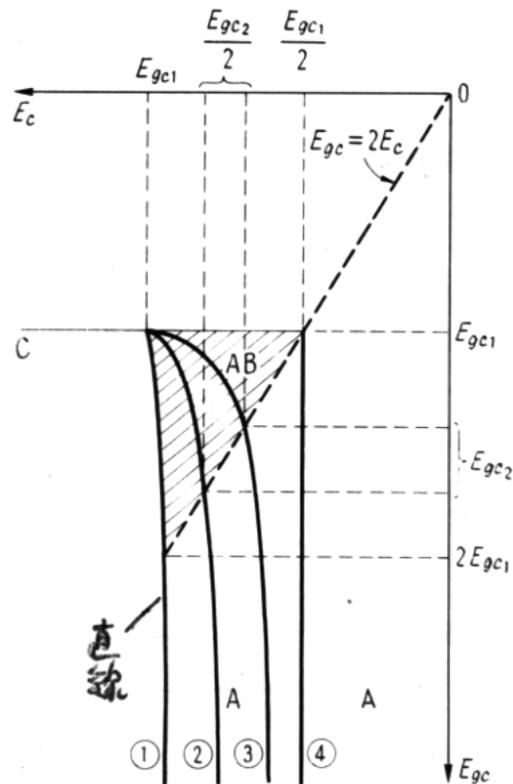
【図 4】
カットオフ電圧

プレート供給電圧 E_b と負荷抵抗が決まると、ロードラインを引くことができます。カットオフしている場合 (A B 級や B 級) を考えると、ロードラインが $E_{g1}=0$ の特性曲線と交わるところのプレート電圧は e_{pmin} となりますので、 E_b について、対称な位置 $2E_b - e_{pmin}$ のところで、ロードラインと反対側の真空管の $E_{g2}=0$ の曲線とが交わります。 $E_{p1}=E_b$ のところで、プレート電流が 0 である最大の E_{g1} (カットオフ電圧) を E_{gc1} とおきます。 $2E_b - e_{pmin}$ のところの、カットオフ電圧を E_{gc2} とおきますと、この間に、カットオフ電圧が来るのが、A B 級ということになります。

しかし、 E_{gc1} は、プレート電圧で決まりますが、 E_{gc2} は、負荷抵抗によっても変わります。そして、 $E_{gc2}/2 \sim E_{gc1}$ ならば、部分的にカットオフすることはありません。このようにいろいろな場合が生じますので、図5にその様子を示しました。 E_c

$< E_{gc1}$ の領域では、常にC級となります。 $E_c = E_{gc1}$ がB級。 $E_{gc1} < E_c < E_{gc1}/2$ の領域では、直線 $E_{gc} = 2E_c$ より上の部分ではAB級、下の部分とグラフの右側では、A級となります。

ここで負荷抵抗の影響を考えてみましょう。負荷抵抗が大きいと、グラフは左に移動してのような直線になります。この場合 $E_{gc2}/2 \sim E_{gc1}$ であって、AB級の領域はなくなり、A級かB（C）級ということになります。負荷抵抗を小さくしていくと、からのようにAB級の領域がだんだん広くなり、0になると、グラフはのようにまた直線になります。この場合 $E_{gc2} = E_{gc1}$ です。



【図5】 動作階級

3. 2次式による近似（シングル動作）

では早速、動特性曲線を簡単な関数で近似してみることにしましょう。まず、平均電流を求めるために、前述の(1)式に使われていたのは、

$$I_p = \begin{cases} \frac{I_{p0} - i_{p\max}}{E_c} (E_g - E_c) + I_{p0} & (E_g > E_c) \\ \frac{i_{p\min} - I_{p0}}{E_c} (E_g - E_c) + I_{p0} & (E_g < E_c) \end{cases} \dots(2)$$

($E_c, E_g < 0$ であることに注意)

のように、3点を結ぶ折れ線で近似した場合です。この場合の出力波形は、振幅の異なるサイン波を、半周期ずつつないだ形となっているので、最大出力時の1周期にわたっての平均電流は、(2)式において、 $E_g = E_c + |E_c| \sin \theta$ において、 θ で積分すれば(1)式が得られるわけです。しかし、動特性曲線は普通もう少しなめらかな曲線となっており、動作原点で折れ曲がってしまうようではお話になりません。これでは歪の影響を正しく求めることは不可能ですし、平均電流の値も実際の測定値と合いません。

では、もう少ししつと近似法を考えましょう。動特性曲線を2次関数(中学校で勉強する放物線です)で表してみます。シングル動作出力段の場合、 $E_p = E_b$ (電源電圧)、 $E_g = E_c$ (バイアス電圧)のところからロードラインを引きますが、ロードラインと $I_p = 0$ との交点を求めます。その点で、プレート電流が流れない、最大のグリッド電圧(カットオフ電圧)を E_{gc} とします。動特性曲線を2次関数で表すとすれば、

$$I_p = i_{p\max} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \dots(3)$$

で近似するのが適当です。 $I_p = 0$ のところ、 $g_m = 0$ (つまりグラフの傾きが0)になるという性質から、 $E_g = E_{gc}$ において、曲線は横軸に接するわけです。(3)式では、 $i_{p\max}$ と E_{gc} がわかれば、グラフの形は決まります。動作原点を $E_g = E_c$ に取れば、

$$E_g = E_c \text{ のとき、 } I_p = I_{p0}$$

$$E_g = 2E_c \text{ のとき、 } I_p = i_{p\min}$$

という点も作図から求まりますので、 E_{gc} を求めなくても、これを使ってグラフの形を決めることが可能です。いま2次関数で近似しましたが、一般的な話として、動特性曲線をn次関数で近似すれば、n次高調波歪までを考慮したことになります。

この条件のもとでグリッド電圧として、 $E_g = E_c + E_s \sin \theta$ を代入します。ここで、 E_c はバイアス電圧を表し、 $E_c < 0$ です。 E_s は入力信号の振幅で、 $-E_c < E_s < 0$ にとりました。こうしておけば、最大出力時だけでなく、出力の小さい場合も含めて考えることができます。三角関数の公式を使って (3) 式を整理すると、

$$I_p = \frac{i_{p \max}}{E_{gc}^2} \left\{ (E_c - E_{gc})^2 + \frac{E_s^2}{2} - 2(E_c - E_{gc})E_s \sin \theta - \frac{E_s^2}{2} \cos 2\theta \right\} \quad \dots(4)$$

となります。ここで、この式の各項の意味を考えてみましょう。括弧の中の第 1 項は、0 信号時のプレート電流 I_{p0} を表しています。第 2 項が、問題のプレート電流の直流的変化分です。第 3 項は、もちろん信号出力であり、第 4 項は、2 次高調波歪ということになります。

まず、平均電流から考えましょう。最大出力時 ($E_s = -E_c$) の直流的変化分を ΔI_{DC} とおけば、第 2 項から、

$$\Delta I_{DC} = \frac{i_{p \max}}{2} \left(\frac{E_c}{E_{gc}} \right)^2 = \frac{i_{p \max}}{2} \alpha^2 \quad \dots(5)$$

(ただし、 $\alpha = E_c / E_{gc}$)

となります。

次に歪率を考えてみましょう。いま動特性曲線を 2 次式で近似しましたので、2 次歪までしか式には現れません。(4) 式の第 3 項と第 4 項の振幅の比を求めると、2 次歪 D_2 は、

$$D_2 = -\frac{\alpha}{4(1-\alpha)} \frac{E_s}{E_c} \quad \dots(6)$$

となります。 $E_c < 0$ 、 $0 < \alpha < 1$ ですから、符号はマイナスで、コサイン波の形から、 $E_g > E_c$ の領域で振幅を増加させる (波形を引き延ばす) ような位相であり、その大きさは信号の振幅 E_s に比例することがわかります。

平均電流を (1) 式と比較するには、 E_c 、 E_{gc} を I_{p0} 、 i_{pmin} に変換する必要があります。第 1 の方法として、 $E_c / E_{gc} = \alpha$ とおくと定義より、

$$\frac{I_{p0}}{i_{p \max}} = \alpha^2 - 2\alpha + 1 \quad \dots(7-1)$$

$$\frac{i_{p\min}}{i_{p\max}} = 4\alpha^2 - 4\alpha + 1 \quad \dots(7-2)$$

ですので、これから α^2 を求めますと、

$$\alpha^2 = \frac{i_{p\max} + i_{p\min} - 2I_{p0}}{2i_{p\max}} \quad \dots(8)$$

となります。従って、平均電流は、

$$\bar{I}_p = I_{p0} + \Delta I_{DC} = \frac{I_{p0}}{2} + \frac{i_{p\max} + i_{p\min}}{4} \quad \dots(9)$$

という結果が導かれます。ここで (8)式のような関係があるため、(9)式における、 I_{p0} 、 $i_{p\max}$ 、 $i_{p\min}$ の係数は一意には定まらないことを注意しておきます。例えば、A級とA B級の境界上の動作点、 $E_{gc} = 2E_c$ では、 $i_{p\max} = 4I_{p0}$ という関係があります。

第2の方法として、カットオフしない場合 (A級) に一般的な方法を示しましょう。3点、 $E_g = 0$ 、 E_c 、 $2E_c$ のときの I_p をそれぞれ、 $i_{p\max}$ 、 I_{p0} 、 $i_{p\min}$ とすれば、グラフは定まります。(3)式の代わりに、

$$I_p = \frac{E_g}{E_c} \left\{ \Delta I_{p0} \frac{E_g}{E_c} + I_{p0} - i_{p\max} - \Delta I_{p0} \right\} + i_{p\max} \quad \dots(10)$$

ただし、

$$\Delta I_{p0} = \frac{i_{p\max} + i_{p\min}}{2} - I_{p0}$$

とおけば、3点を通るグラフとなります。ここで、 $E_g = E_c + E_s \cdot \sin\theta$ を加え、三角関数の公式を用いて整理すれば、

$$I_p = I_{p0} + \frac{\Delta I_{p0}}{2} \frac{E_s^2}{E_c^2} - \frac{i_{p\max} - i_{p\min}}{2} \frac{E_s}{E_c} \sin\theta - \frac{\Delta I_{p0}}{2} \frac{E_s^2}{E_c^2} \cos 2\theta \quad \dots(11)$$

と表せます。平均プレート電流は、(9)式と同じ結果になります。最大出力は、(11)式の第3項に注目すればよく、 $E_s = -E_c$ において、負荷抵抗を R_L とすれば、

$$I_{sig} = \frac{i_{p\max} - i_{p\min}}{2} \quad \text{として、}$$

$$P_{o\max} = \frac{I_{sig}^2 R_L}{2} = \frac{(i_{p\max} - i_{p\min})^2 R_L}{8} \quad \dots(12)$$

となります。出力は実効値をとるために1/2をかけてあります。これは一

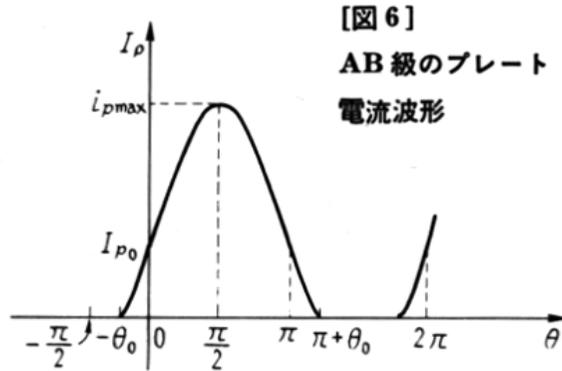
般に使われている式と同じものです。2次歪率は、(11)式の第3項と第4項の比ですから、

$$D_2 = -\frac{\Delta I_{p0}}{i_{p\max} - i_{p\min}} = -\frac{i_{p\max} + i_{p\min} - 2I_{p0}}{2(i_{p\max} - i_{p\min})} \quad \dots(13)$$

となります。

4. 2次式による近似(プッシュプル動作)

次にプッシュプル動作を考えてみましょう。プッシュプル動作の場合、動特性曲線はいろいろな形をとり得るのです。シングル動作と同じくA級の場合、AB級、B級で信号の1サイクルのうちに、カットオフする区間がある場合です。出力管1本当たりの動特性曲線を2次関数で近似するとします。A級の場合は、シングル動作と同じですから、まず、AB級、B級の場合を考えてみましょう。



カットオフ電圧 E_{gc}

は、 E_c E_{gc} $2E_c$ の間

にあります。 $E_{gc} = 2E_c$ であれば、A級ですし、 $E_{gc} = E_c$ であればB級、中間はAB級ということになります。前と同様に、 I_p を、

$$I_p = \begin{cases} i_{p\max} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 & (E_g \geq E_{gc}) \\ 0 & (E_g < E_{gc}) \end{cases} \quad \dots(14)$$

として、 $E_g = E_c + E_s \sin \theta$ を加えれば、(4)式を求めたのと同様に、

$$I_p = \begin{cases} \frac{i_{p\max}}{E_{gc}^2} \left\{ (E_c - E_{gc})^2 + \frac{E_s^2}{2} + 2(E_c - E_{gc})E_s \sin \theta - \frac{E_s^2}{2} \cos 2\theta \right\} & (E_g \geq E_{gc}) \\ 0 & (E_g < E_{gc}) \end{cases}$$

...(15)

となります。ここで重要な点は、プレート電流がカットオフするので、1サイクルでの平均値を求める場合、(15)式の第3項、第4項の積分が0にならないことです。sin $\theta_0 = -(E_c - E_{gc}) / E_s$ とすると、プレート電流波形は、図6のようになります。

前と同様に、 θ について $-\pi/2$ から $\pi/2$ の間で積分します。 $E_c / E_{gc} = \alpha$ 、 $E_s = -E_c$ において整理すると、

$$\bar{I}_p = \frac{\pi + 2\theta_0}{2\pi} I_{p0} + \left\{ \frac{\pi + 2\theta_0}{4\pi} \alpha^2 + \frac{3}{2\pi} (1 - \alpha)(2\alpha - 1)^{1/2} \right\} i_{pmax} \dots(16)$$

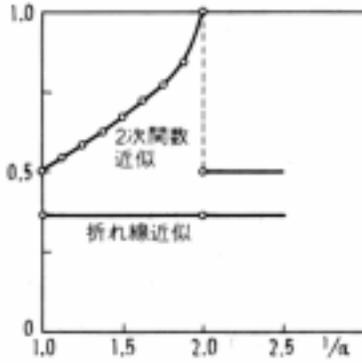
となります。ここで、右辺の値はバイアス電圧とカットオフ電圧の関係により、変化します。これが、最初に申し上げた平均電流の問題です。1 / α をパラメータとして計算してみると、表1のようになります。ここで、特性曲線から読みとった、 I_{p0} や i_{pmax} から計算するには、まず、

$$\alpha = 1 - (I_{p0} / i_{pmax})^{1/2} \dots(17)$$

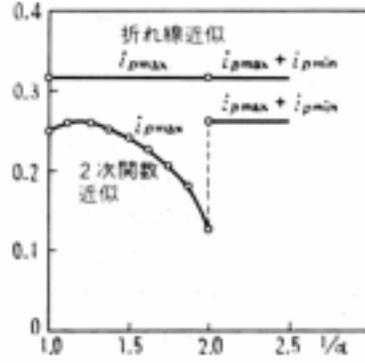
によって α を求め、表1または図7から係数を読み取って下さい。

1 / α	θ_0	I_{p0} の係数	i_{pmax} の係数	備考	
1.00	0	0.500	0.250	B級動作	
1.125		0.540	0.260		
1.25	0.253	0.580	0.260		
1.375		0.622	0.252		
1.5	/6	0.667	0.240		
1.625		0.715	0.224		
1.75	0.848	0.770	0.203		
1.875		0.839	0.177		
2.00	/2	1.000	0.125		A級動作

表1 . 平均プレート電流



【図7】 (a) I_{p0} の係数



(b) i_{pmax} の係数

2次関数で近似した場合、 I_{p0} と i_{pmax} は独立には定まらないので、前にも述べたように、 $1/\alpha = 2$ (A級)の場合、 $i_{pmax} = 4I_{p0}$ という関係があります。この場合、 I_{p0} と i_{pmax} の係数は、0.5、0.25の組合せでも、0.3、0.3の組合せでもよいことがわかります。つまり、最初にあげた「全ての係数を0.3とする」という設計法は、このA級の場合の2次関数による近似計算の結果と完全に一致しています。A B級やB級の場合には、さらに i_{pmax} の係数は小さくなります。これによると、従来使われていた折れ線近似による(1)式に比べて、 i_{pmax} の影響がだいぶ小さく見積もられることがわかるでしょう。(1)式のおかげで、いままでアンプ設計者は、容量に余裕のある電源トランスを使われてきたわけで、これは必要以上に大きなトランスを使わせようという、トランス屋の陰謀だったのではないかと思います。(?)

次に、最大出力や歪率を計算するために、合成ロードラインを考えてみましょう。図8のように、 E_{gc} が E_c と $2E_c$ の間にある場合 (A B級)を考えます。合成電流 I_0 は、3つの場合に分けて考えますから、

$E_g > 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_0 = i_{pmax} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \quad \dots(18-1)$$

$E_g < E_{gc}$ では、

$$I_0 = -i_{pmax} \left(\frac{2E_c - E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \quad \dots(18-2)$$

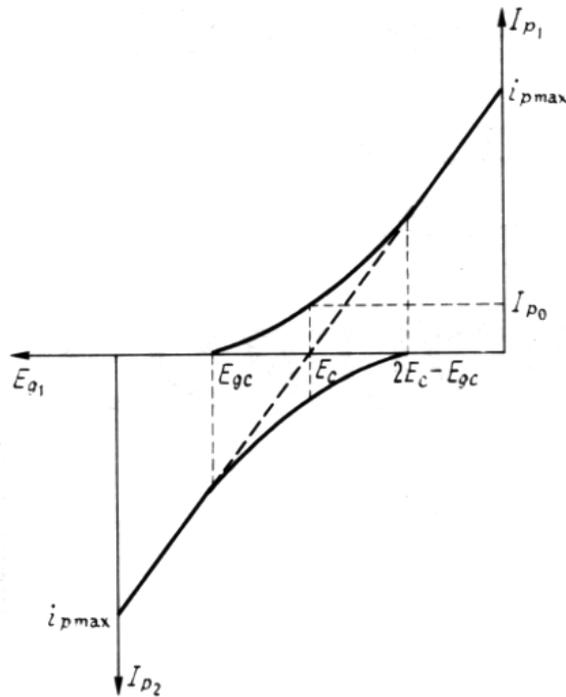
$E_{gc} < E_g < 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_0 = i_{p\max} \left\{ \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 - \left(\frac{2E_c - E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \right\} \quad \dots(18-3)$$

$$= \frac{4i_{p\max}}{E_{gc}^2} (E_g - E_c)(E_c - E_{gc})$$

となります。ここで強調しておきたいのは、2つの曲線が、カットオフしていないような小信号入力の場合 ($E_{gc} < E_g < 2E_c - E_{gc}$ の領域)、合成曲線は1次関数になり、歪は0ということになります。もちろんこの結論は不完全なのですが、2次関数近似ではそういう結果になります。完全なプッシュプル動作では、偶数次の歪は発生しないからです。

しかし、1サイクルの間に、片方のプレート電流がカットオフするような動作点、つまりA級やB級の場合、動特性曲線が直線からはずれるため、3次以上の奇数次の歪を発生します。この場合の歪を求める計算は、一筋縄では行きません。基本波とその高調波によるフーリエ展開を求めなければなりません（面倒ですね・・・）。この計算は次回に回します。



【図8】 動特性曲線の合成

プッシュプル動作の場合も、カットオフし

ていないA級の場合ならば、最大出力を求めるには、 E_{gc} を使わずに i_{pmin} を使って式を定めた方が簡単です。プッシュプルの合成電流を考えてみましょう。反対側の真空管のプレート電流は (10)式から類推して、

$$I'_p = \frac{2E_c - E_g}{E_c} \left\{ \Delta I_{p0} \frac{2E_c - E_g}{E_c} + I_{p0} - i_{p\max} - \Delta I_{p0} \right\} + i_{p\max} \quad \dots(19)$$

と表せますので、(10)式との差をとって整理すれば、

$$I_o = I_p - I'_p = - \left(\frac{E_g}{E_c} - 1 \right) (i_{p\max} - i_{p\min}) \quad \dots(20)$$

のような1次関数になります。 $E_g = E_c + E_s \cdot \sin\theta$ とすれば I_o の最大振幅は、
 $I_{sig} = (i_{p\max} - i_{p\min})$

であるから、最大出力 $P_{o\max}$ は、

$$P_{o\max} = \frac{I_{sig}^2 R_L / 4}{2} = \frac{(i_{p\max} - i_{p\min})^2 R_L}{8} \quad \dots(21)$$

と求められます。これは、従来使われていた式と全く同じです。歪率はやはり0%ということになります。

次回のお知らせ

今回は、動特性曲線を2次関数で近似した場合について計算してみました。次回は、その続きと、動特性曲線を3次関数で表した場合について詳しく解析してみます。3次関数で近似すれば、3次歪まで考慮したことになります。その場合、プッシュプル動作によって、なんと2次歪だけでなく、3次歪の打ち消しまでも可能になるのです・・・。ご期待下さい。