

真空管の動特性曲線とその応用

- A B 級 P P による 3 次歪の打ち消し -

木下 順二

はじめに

管球アンプの歪は、低次の高調波成分が中心であるため、耳につきにくいと言われます。そもそも、再生装置には少し歪がある方がよいと言う人もいるくらいで、直線性のよい 3 極管のシングルアンプには根強い人気があります。そのような N F B の少ないシングルアンプの設計では、歪打ち消しということがよく問題となりますが、この場合、打ち消しの対象となるのは 2 次歪です。シングルアンプでは、ともすると 2 次歪が多くなり過ぎるので、前段との間で打ち消しを行うことが多いのです。もちろん、発生する歪は負荷抵抗などの条件によって変化しますから、完全に打ち消すことは不可能です。これに対してプッシュプル動作の場合には、完全にプッシュプルのバランスが取れていれば、常に 2 次歪は打ち消されますから、シングルアンプに比べてはるかに低歪とすることが可能になることは、ご存知の通りです。しかし、その場合でも普通の設計では 3 次歪を打ち消すことはできませんから、歪の主成分は 3 次歪になります。シングルとプッシュプルにおける歪成分の違いが、聴感にどのような影響を与えているかは興味深い問題でしょう。

さて今回は、アンプの入出力特性を計算で求めるため、真空管の動特性曲線を 2 次関数で近似したときの、計算を示しました。今回は、その続きとして歪率の計算法を述べ、さらに A B 級プッシュプル動作では、偶数次の歪を打ち消すだけでなく、3 次歪の打ち消しも可能である、という話をしましょう。これを確かめるためには、動特性曲線を 3 次関数で近似して、本来の 3 次歪と、2 次歪を合成することによってできる 3 次歪の大きさを比較しなければなりません。計算はかなり複雑ですが、確かにそのような条件が存在するという結果が得られました。

1. 2 次関数近似の場合のフーリエ展開による歪の計算

前回の 2 次関数による近似で、プッシュプル動作をさせた場合、合成口

ードラインから求めた合成電流は、両側の球がカットオフしているかどうかにより、グリッド電圧を3つの領域に分けて、

$E_g > 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_o = \frac{i_{p\max}}{E_{gc}^2} \left\{ (E_c - E_{gc})^2 + \frac{E_s^2}{2} + 2(E_c - E_{gc})E_s \sin \theta - \frac{E_s^2}{2} \cos 2\theta \right\} \quad \dots(1-1)$$

$E_g < E_{gc}$ では、

$$I_o = -\frac{i_{p\max}}{E_{gc}^2} \left\{ (E_c - E_{gc})^2 + \frac{E_s^2}{2} - 2(E_c - E_{gc})E_s \sin \theta - \frac{E_s^2}{2} \cos 2\theta \right\} \quad \dots(1-2)$$

$E_{gc} < E_g < 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_o = \frac{4i_{p\max}}{E_{gc}^2} (E_c - E_{gc})E_s \sin \theta \quad \dots(1-3)$$

と表すことができました。入力信号が小さい場合は、(1-3)式のみが適用されますので、歪は0なのですが、入力信号が大きくなって、片方の球がカットオフする領域に入ると、2次関数が合成されることにより、高次の歪を生じます(図1)。

一般に周期的波形はフーリエ級数に展開できて、

$$I_o = a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \sin 2\theta + a_3 \sin 3\theta + \dots + b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta + b_3 \cos 3\theta + \dots \quad \dots(2)$$

という形に表せます。計算を少し簡単にするために、波形の対称性を考えてみましょう。基本波がサイン波であるならば、動特性曲線の形から考えて、出力波形も奇関数です。また、 $0 < \theta < \pi/2$ までの波形と、 $\pi/2 < \theta < \pi$ の波形とは、対称で、後半の半サイクルについても同様の対称性があることから、奇数次の高調波、それもサイン波のみを考えればよいことがわかります。

出力電流の第 n 次高調波
(基本波も含む) のうちサイ
ン波の振幅を a_n とすれば、

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I_o \sin n\theta d\theta$$

...(3)

となります。実際に計算を行
うには、(1)式の I_o を代入して、
 $n = 1, 3, 5 \dots$ につい
て積分します。積分の範囲は、
 $\sin \theta_0 = -\frac{(E_c - E_{gc})}{E_s}$ を満

たすような θ_0 を用いて、 θ_0

$\theta < \pi/2$ では、(1-1)式、 $-\pi/$
 $2\phi\theta < -\theta_0$ では (1-2) 式を用
い、 $-\theta_0\phi\theta < \theta_0$ では、(1-3)式
を用います。ここで、三角関

数の積分を復習しておく、

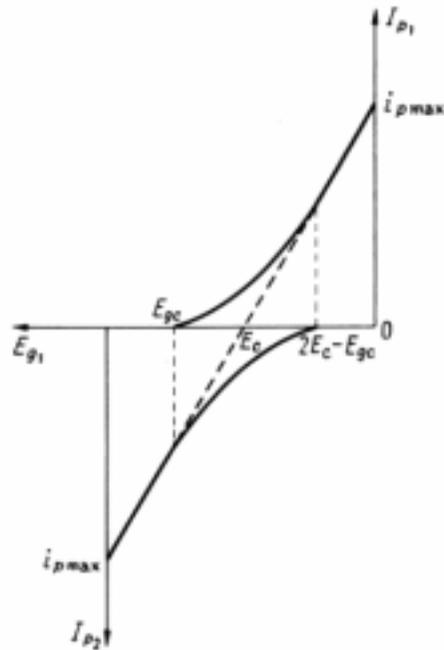
$$\int \sin n\theta \cdot \sin m\theta d\theta = \begin{cases} \frac{\theta}{2} - \frac{\sin 2n\theta}{4n} + C & (n = m) \\ \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(n-m)\theta}{n-m} - \frac{\sin(n+m)\theta}{n+m} \right] + C & (n \neq m) \end{cases}$$

$$\int \sin n\theta \cdot \cos m\theta d\theta = \begin{cases} -\frac{\cos 2n\theta}{4n} + C & (n = m) \\ -\frac{1}{2} \left[\frac{\cos(n+m)\theta}{n+m} + \frac{\cos(n-m)\theta}{n-m} \right] + C & (n \neq m) \end{cases}$$

...(4)

と計算できます。フーリエ展開したときの 1 次と 3 次のサイン波の係数は、

(4)式の関係および、 $\alpha = \frac{E_c}{E_{gc}}$ を使って、



【図1】 動特性曲線の合成

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{4i_{p\max}}{\pi} \left[\left\{ (\alpha - 1)^2 + \frac{3\alpha^2 E_s^2}{4E_c^2} \right\} \cos \theta_0 + \alpha(\alpha - 1) \frac{E_s}{E_c} \frac{\pi + 2\theta_0 - \sin 2\theta_0}{2} \right. \\
&\quad \left. - \frac{\alpha^2 E_s^2}{4E_c^2} \frac{\cos 3\theta_0}{3} \right] \\
a_3 &= \frac{4i_{p\max}}{\pi} \left[\left\{ (\alpha - 1)^2 + \frac{\alpha^2 E_s^2}{2E_c^2} \right\} \frac{\cos 3\theta_0}{3} \right. \\
&\quad + \alpha(\alpha - 1) \frac{E_s}{E_c} \left\{ \frac{\sin 2\theta_0}{2} - \frac{\sin 4\theta_0}{4} \right\} \quad \dots(5) \\
&\quad \left. - \frac{\alpha^2 E_s^2}{4E_c^2} \left\{ \frac{\cos 5\theta_0}{5} + \cos \theta_0 \right\} \right]
\end{aligned}$$

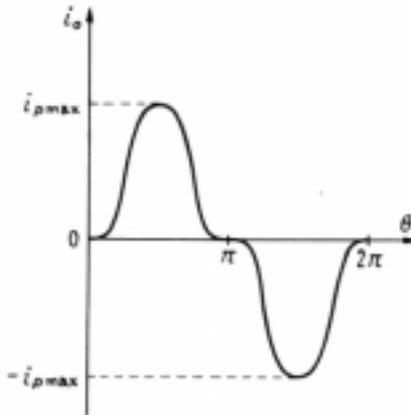
となります。ここで注意しなければならないのは、このようにプレート電流がカットオフするA B級やB級の動作では、2次関数で近似しているにも拘わらず、n = 5でも係数は0ではないことです。5次以上の計算は、なかなか大変ですので、興味のある方は計算してみてください。(5)式の a_1 から計算すると、最大出力はかなり複雑な式となります。無帰還アンプを作るときのために、A級の最大出力との比の計算値を表1に示しておきました。歪が多いと、出力は減少してしまいます。まあ通常の場合は、A級のときの計算式(前回に示しました)を使えばよいでしょう。次に、(5)を使って、代表的な場合の3次歪について考えてみましょう。

$1 / \alpha$	P_{omax} A級との比	最大出力時の 歪率 D_s (%)	備考
1.00	0.721	20.00	B級
1.125	0.781	14.59	
1.25	0.835	10.12	
1.375	0.882	6.55	
1.50	0.922	3.83	
1.625	0.954	1.91	
1.75	0.978	0.71	
1.875	0.994	0.13	
2.00	1.000	0.00	A級

表 1 最大出力と歪率

$E_{gc} = 2E_c$ の A 級動作では、前述したように、歪率は常に 0 % となります。 $E_{gc} = E_c$ の B 級動作では、3 次歪率は、信号の大きさに関係なく、20 % (!) となります。このときの波形は、図 2 のように、2 倍高調波を反対向きにつなぎ合わせたような形になって、大きなノッチング歪を発生しています。

これではひどすぎるので、ちょうど中間の動作点、 $E_{gc} = \frac{3}{2}E_c$ の A B 級動作を考えてみましょう。このとき、最大出力時の 3 次歪率は約 3.8 % と計算されます。この数字の比較から、B 級と A B 級の差がいかに大きいものか、おわかりいただけだと思います。もちろん、入力信号の小さい範囲では、A 級動作と同じく歪率は 0 % と計算されます。これらの結果をまとめたのが、表 1 です。



【図 2】 B 級動作の出力波形

(5) 式の a_3 の符号は α の値に拘わらず常に負です。このことから、A B 級動作では、3 次高調波が波形の山を尖らせるような位相で発生することがわかります。もとの動特性曲線は 2 次関数だったのにも拘わらず、カットオフ領域のある A B 級動作にしたため、2 次関数の合成から 3 次歪が生じたわけでは、逆にならぬところが、一般に 3 極管や 5 極管のもともとの 3 次高調波は、逆に波形の山をつぶすような位相で発生することが知られています。従って、全体としての 3 次歪は、両者を合成したものとなります。このことは、A B 級プッシュプル動作によって、3 次歪についても打ち消しが可能であることを示唆しているのです。

2. 3 次関数による近似・プッシュプル動作

では、3 次歪まで考慮に入れるため、動特性曲線を 3 次関数で近似して

みましょう。プレート電流がカットオフする条件での、2次関数による近似式は、

$$I_p = i_{p \max} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \quad \dots(6)$$

でした。この関数を少し変形して(図3)、

$$I_p = i_{p \max} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{E_g}{E_f} \right) \quad \dots(7)$$

という式がよいと思われます。

この式に出て来る E_f は、 $E_g = E_f$ の点で、 $I_p = 0$ となるような仮想的な値で、 $E_f > 0$ です。もし、A級動作すなわち $E_{gc} > 2E_c$ であれば、未知数の個数からいって、 I_{p0} 、 $i_{p \min}$ の値を特性曲線から読み取って使うことにより、 E_{gc} と E_f を定めることができます。すなわち、

$$\frac{I_{p0}}{i_{p \max}} = \left(\frac{E_c}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{E_c}{E_f} \right) \quad \dots(8-1)$$

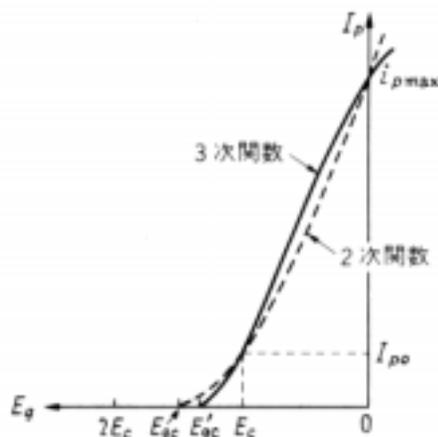
$$\frac{i_{p \min}}{i_{p \max}} = \left(\frac{2E_c}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{2E_c}{E_f} \right) \quad \dots(8-2)$$

また、 $E_{gc} > 2E_c$ の場合は、 $E_g = E_c / 2$ のときの電流 $i_{p \text{mid}}$ を読み取って、

$$\frac{i_{p \text{mid}}}{i_{p \max}} = \left(\frac{E_c}{2E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{E_c}{2E_f} \right) \quad \dots(8-3)$$

とすれば、関数形を定めることができます。ただ、これらの式から $\alpha = E_c / E_{gc}$ を直接求めるのは難しいので、適宜変形して用いるか、数値計算で求めることになるでしょう。

(7)式に、 $E_g = E_c + E_s \sin \theta$ を代入し、三角関数の公式を使って整理すると、



【図3】 3次関数近似

$$\begin{aligned}
I_p = & \frac{i_{p \max}}{E_{gc}} \left[(E_c - E_{gc})^2 \left(1 - \frac{E_c}{E_f} \right) + \frac{E_s^2}{2} \left(1 + \frac{2E_{gc} - 3E_c}{E_f} \right) \right. \\
& + \left. \left\{ (E_c - E_{gc}) \left(2 + \frac{E_{gc} - 3E_c}{E_f} \right) E_s - \frac{3E_s^3}{4E_f} \right\} \sin \theta \quad \dots(9) \right. \\
& \left. - \frac{E_s^2}{2} \left(1 + \frac{2E_{gc} - 3E_c}{E_f} \right) \cos 2\theta + \frac{E_s^3}{4E_f} \sin 3\theta \right]
\end{aligned}$$

というプレート電流の式が得られます。この程度で驚かないで下さい。まだまだ先は長いですから・・・この式の各項の意味を考えてみます。括弧の中の第1項は、 I_{p0} を表しています。第2項は、プレート電流の直流的変化分です。第3項は信号出力で、第4項、第5項は、それぞれ2次高調波、3次高調波に相当します。2次関数近似の場合と比較すると、3次高調波の項が加わり、それぞれの項が E_f の関数となっています。A級シングルアンプならば、これでプレート電流の計算は終わり、ただちに最大出力や歪率が求められます。

プッシュプル動作の場合には、プレート電流がカットオフする可能性がありますので、計算は複雑になります。では、A B級、B級の場合も含めて、平均プレート電流を計算してみましよう。 E_g E_{gc} では、(9)式が成立し、 $E_g < E_{gc}$ では、 $I_p = 0$ となります。 $\sin \theta_0 = -(E_c - E_{gc}) / E_s$ として、 α を変えたときの平均電流を計算してみると、表2のようになります。(8)式を使って E_f を消去したり、結構大変な計算が必要です。参考までに式を書いておくと、

$$\begin{aligned}
\bar{I}_p = & \frac{1}{2\pi} \left[\pi + 2\theta_0 + \frac{1}{2(\alpha - 1)^2} \left\{ (3 - 2\alpha)(\pi + 2\theta_0) - (5 - 2\alpha)(3 - 2\alpha) \cos \theta_0 \right. \right. \\
& \left. \left. - (3 - 2\alpha) \sin 2\theta_0 + \frac{\cos 3\theta_0}{3} \right\} \right] I_{p0} \\
& + \frac{1}{2\pi\alpha^2} \left\{ -(1 - \alpha)(\pi + 2\theta_0) + \frac{4(\alpha - 1)^2 + 3}{2} \cos \theta_0 \right. \\
& \left. + (1 - \alpha) \sin 2\theta_0 - \frac{\cos 3\theta_0}{6} \right\} i_{p \max} \\
& \dots(10)
\end{aligned}$$

この表で、B級動作のときの I_{p0} の係数が になっていますが、このとき

$I_{p0} = 0$ なので、間違いではありません。2次関数近似の場合と同様に、3次関数による近似の場合でも、 i_{pmax} の係数はあまり大きくならないことがわかると思います。

次は、プッシュプル動作による波形の合成を考えます。 E_{gc} が E_c と $2E_c$ の間にある（A B級）場合を考えます。合成電流 I_o は、3つの場合に分けて考える必要があります、

$E_g > 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_o = i_{pmax} \left(\frac{E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{E_g}{E_f} \right) \quad \dots(11-1)$$

$E_g < E_{gc}$ では、

$$I_o = -i_{pmax} \left(\frac{2E_c - E_g}{E_{gc}} - 1 \right)^2 \left(1 - \frac{2E_c - E_g}{E_f} \right) \quad \dots(11-2)$$

$E_{gc} < E_g < 2E_c - E_{gc}$ では、

$$I_o = \frac{2i_{pmax}}{E_{gc}^2} \left\{ (E_c - E_{gc}) \left(2 + \frac{E_{gc} - 3E_c}{E_f} \right) (E_g - E_c) - \frac{(E_g - E_c)^3}{E_f} \right\} \quad \dots(11-3)$$

と表現できます。ここで、 $E_g = E_c + E_s \cdot \sin\theta$ において、フーリエ展開するわけです。

1 /	0	I_{p0} の係数	i_{pmax} の係数	備考
1.00	0		0.212	B級動作
1.125		3.707	0.221	
1.25	0.253	1.361	0.229	
1.375		0.859	0.235	
1.50	/6	0.667	0.240	
1.625		0.576	0.244	
1.75	0.848	0.529	0.247	
1.875		0.507	0.249	
2.00	/2	0.500	0.250	A級動作

表2 . 平均プレート電流

$\alpha = E_c / E_{gc}$, 2次関数からのずれの大きさを表すパラメータ $= E_c / E_f$

を使って、さしあたって必要な、基本波と3次高調波のフーリエ係数だけを求めると、

$$\begin{aligned}
 a_1 = \frac{4i_{p\max}}{\pi} & \left[\left\{ \frac{E_s}{E_c} (\alpha - 1)(2\alpha + \beta - 3\alpha\beta) - \frac{E_s^3}{4E_c^3} \right\} \frac{\pi + 2\theta_0 - \sin 2\theta_0}{4} \right. \\
 & + \frac{E_s^3}{8E_c^3} \alpha^2 \beta \left(\frac{\sin 2\theta_0}{2} - \frac{\sin 4\theta_0}{4} \right) \\
 & + \frac{E_s^2}{4E_c^2} \alpha (\alpha + 2\beta - 3\alpha\beta) \left(3\cos \theta_0 - \frac{\cos 3\theta_0}{3} \right) \\
 & \left. + (\alpha - 1)^2 (1 - \beta) \cos \theta_0 \right]
 \end{aligned}$$

...(12-1)

$$\begin{aligned}
 a_3 = \frac{4i_{p\max}}{\pi} & \left[\left\{ \frac{E_s}{E_c} (\alpha - 1)(2\alpha + \beta - 3\alpha\beta) - \frac{E_s^3}{4E_c^3} \alpha^2 \beta \right\} \left(\frac{\sin 2\theta_0}{4} - \frac{\sin 4\theta_0}{8} \right) \right. \\
 & + \frac{E_s^3}{4E_c^3} \alpha^2 \beta \frac{3\pi + 6\theta_0 - \sin 6\theta_0}{12} + (\alpha - 1)^2 (1 - \beta) \frac{\cos 3\theta_0}{3} \\
 & \left. + \frac{E_s^2}{4E_c^2} \alpha (\alpha + 2\beta - 3\alpha\beta) \left(\frac{2\cos 3\theta_0}{3} - \cos \theta_0 - \frac{\cos 5\theta_0}{5} \right) \right]
 \end{aligned}$$

...(12-2)

となります。うーむ、かなりしんどい計算でした。ちょっとこのあたりは私も自信がありませんが(！？)、たぶん間違いはないと思います。実際にいくつかの条件を選んで、大きさを見積もってみましょう。

$E_{gc} = 2E_c$ のA級動作では、最大出力時の3次歪率は、

$$D_3 = -\frac{\beta}{8 - 3\beta} \quad \dots(13-1)$$

ですが、 $\beta < 0$ ですから、この歪の符号はプラス、シングル動作と同様に、波形をつぶすような位相であることがわかります。

$E_{gc} = E_c$ のB級動作では、最大出力時の3次歪率は、

$$D_3 = -\frac{0.170 + 0.0802\beta}{0.848 - 0.599\beta} \quad \dots(13-2)$$

となります。 β は小さな値なので、普通この歪の符号はマイナスです。従って、波形をとがらせるような位相であることがわかります。もし、 $\beta = -2.12$ になると、最大出力時の3次歪が0になります。

さて、次に $E_{gc} = (3/2)E_c$ のA B級動作を考えてみましょう。最大出力時の3次歪率は、

$$D_3 = -\frac{0.0368 + 0.179\beta}{0.960 - 0.388\beta} \quad \dots(13-3)$$

と計算できます。この式を見ると、 $\beta = -0.206$ のところ、3次歪率が0になることがわかります。これはかなり実現性のある値です。(13-1)式を見ればわかるように、A級動作の歪率は β によって決まりますので、 β の小さい真空管はもともと3次歪が少ないということになりますし、3次歪がもともと多い真空管ほど、深いバイアスをかけないと、歪は打ち消されないこととなります。これまでの結果をまとめたのが、表3です。

$1/\alpha$	歪0となる β	備考
1.00	-2.116	B級
1.125	-1.251	
1.25	-0.723	
1.375	-0.399	
1.50	-0.206	
1.625	-0.094	
1.75	-0.034	
1.875	-0.006	
2.00	0.0	A級

表3 . 3次歪の打ち消し

α 、 β の値は真空管の種類や、負荷抵抗、動作点の選び方によって異なりますが、もともと3次歪より2次歪の方が充分大きい球であれば、必ず3次歪が0になる動作条件が存在することがわかりました。ただ、今は負荷を固定抵抗として扱っていますが、実際にはインピーダンスが変動するため、もともとの3次歪も少ない条件でないと、すぐ打ち消しのバランスは崩れてしまうと思われます。また、カットオフ電圧までよく揃ったペアチューブが手に入るとは限りませんし、5次以上の歪については考慮していません。まあ、実際にその条件を見つけだせるかどうかはまた別の問題ですので...

3. 2次関数、3次関数による近似・まとめ

ここまで、かなり強引に計算を進めてきました。どのように利用したらよいか、振り返って考えてみましょう。まず、最初に指摘した、プッシュプル動作における平均プレート電流の問題ですが、2次関数による近似と、3次関数による近似をまとめてみると、表4のようになります。

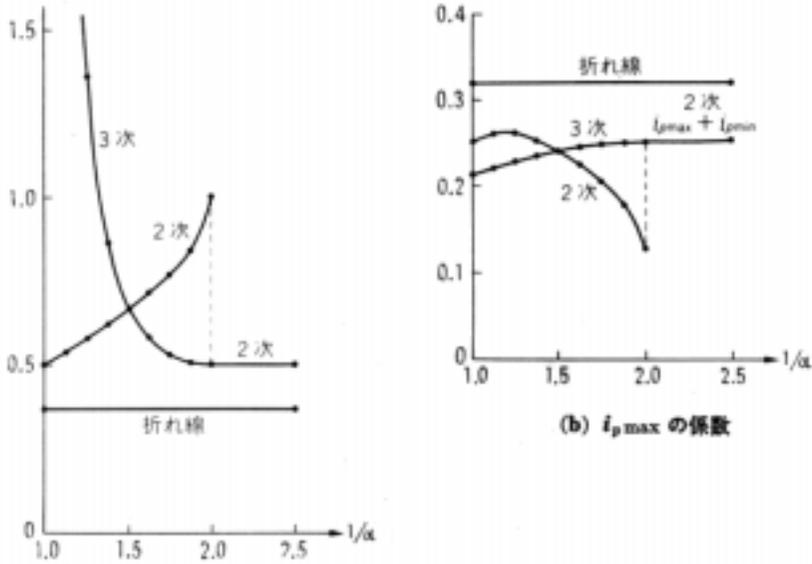
1 / α	2次関数近似		3次関数近似		備考	
	$\times I_{p0}$	$\times i_{pmax}$	$\times I_{p0}$	$\times i_{pmax}$		
1.00	0.500	0.250		0.212	B級動作	
1.125	0.540	0.260	3.707	0.221		
1.25	0.580	0.260	1.361	0.228		
1.375	0.622	0.252	0.859	0.235		
1.50	0.667	0.240	0.667	0.240		
1.625	0.715	0.224	0.576	0.244		
1.75	0.770	0.203	0.529	0.247		
1.875	0.839	0.177	0.507	0.249		
2.00	1.000	0.125	0.500	0.250		A級動作

折れ線	0.364	0.318
-----	-------	-------

($I_p = C_1 \times I_{p0} + C_2 \times i_{pmax}$ という形式で表す)

表4. 平均プレート電流

この様子をグラフに描いたのが、図4です。1 / $\alpha = 1.5$ のところでは、2次関数近似と3次関数近似で、全く同じ式が得られています。その他のところでは、ずいぶん異なるようですが、 I_{p0} と i_{pmax} は互いに関係がありますので、計算してみるとほとんど差はないはずで、いずれにしても、折れ線近似よりは、ずっとまとめた数値を出します。2つの近似法を比較する場合、式が異なるため、同じ E_c に対しても E_{gc} の値が異なり、 α も違うということに注意しておきましょう。2次関数近似で充分と思いますが、まあ、心配症の人は、両方の近似法で計算してみて、多い方をとるとよいかもかもしれません。



【図4】 (a) I_{p0} の係数

3極管シングルアンプの解析では、2次関数近似で充分でしょう。それは、歪の主成分が2次高調波だからです。最大出力も従来と同じように、

$$P_{o\max} = \frac{(i_{p\max} - i_{p\min})^2 R_L}{8}$$

2次歪率は、

$$D_2 = -\frac{\Delta I_{p0}}{i_{p\max} - i_{p\min}} = -\frac{i_{p\max} + i_{p\min} - 2I_{p0}}{2(i_{p\max} - i_{p\min})} \quad \dots(14)$$

で計算できます。ただ、多極管の場合は、3次歪が多くなることが多いので、3次関数近似が必要になってくるでしょう。

プッシュプル動作では、歪の主成分が3次高調波ですので、歪の見積りには、3次関数近似が必要になってきます。NFBをかけた場合など、歪みの少ない状態であれば、最大出力を求めるのには、2次関数近似で充分でしょう。

$$P_{o\max} = \frac{(i_{p\max} - i_{p\min})^2 R_L}{8} \quad \dots(15)$$

無帰還時の最大出力の厳密な計算、及び歪率の計算には、(12)式を使いま

すが、パラメータの決め方も含めてなかなか大変です。手作業の限界といえましょう。ただ、A B級にしてうまく動作点を選べば、偶数次の歪だけでなく、最大出力時の3次歪も打ち消せることがわかりました。

おわりに

面倒な計算に、最後までお付き合いいただき有難うございました。計算はあくまでも計算にすぎませんが、いままで経験則として知られていたものを、式として統一した形で示すことができたと思います。

この記事では、歪の打ち消し、ということを強調しました。しかし、初めに述べたように歪が少ないほどいいかどうかは、あまり明らかではありません。プッシュプルアンプの場合、2次歪が打ち消され、3次歪が中心となるため、シングルアンプとは音質的に違いが出ます。2次歪のある方が好きだという人も多いでしょうし、3次歪についても同様です。ただ、いずれにしろ多すぎではダメなので、設計の段階で歪の大きさをコントロールすることが是非とも必要です。それが素材としての真空管の魅力を十分に生かす鍵となるのではないのでしょうか。