

# シングル出力段のパワーバンド幅

Ayumi's Lab.

2003年9月5日

Revised 2003年9月7日

## 目次

- 1 シングル出力段の低域の等価回路 1
  - 2 低域のロードライン 3
  - 3 最大出力時に何が起こるか 6
- このドキュメントでは、出力トランスの磁気飽和が起こらない範囲で、どれだけのノンクリップ出力が得られるかを示します。

## 1 シングル出力段の低域の等価回路

シングル出力段の低域の等価回路は、図1のようになります。KからPまでが真空管で、その他が出力トランスです。

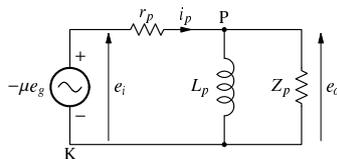


図1: シングル出力段の低域の等価回路

$Z_p$  は出力トランスの公称一次インピーダンスで、 $L_p$  は一次インダクタンスです。この2つが並列になったものが真空管の負荷になるので、これを

$$Z_2 = Z_{L_p} // Z_p \quad (1)$$

とおきます。  $Z_{L_p}$  は一次インダクタンスのインピーダンスで、  $Z_{L_p} = j\omega L_p$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2\pi f$ ) です。また、電圧源から見た総インピーダンスを

$$Z_1 = r_p + Z_2 \quad (2)$$

とおきます。  $i_p$  の方向が逆ですが、それはロードラインを描くときに通常の向きに戻します。

ここで、プレート電流  $i_p$  と出力トランス一次側の電圧  $e_o$  の関係を調べます。等価回路から、

$$e_i = i_p(r_p + Z_2) = i_p Z_1 \quad (3)$$

$$e_o = e_i \frac{Z_2}{r_p + Z_2} = e_i \frac{Z_2}{Z_1} \quad (4)$$

という関係が成り立ちます。これらの式から  $e_i$  を消去すると、

$$e_o = Z_2 i_p \quad (5)$$

という関係が得られます。

ここで、 $Z_2 = Z_{L_p} // Z_p$  に注目すると、

$$\begin{aligned} Z_2 &= Z_{L_p} // Z_p \\ &= \frac{j\omega L_p Z_p}{j\omega L_p + Z_p} \\ &= \frac{Z_p}{1 + \frac{Z_p}{j\omega L_p}} \\ &= Z_p \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega \frac{L_p}{Z_p}}} \end{aligned}$$

$T_2 = L_p / Z_p$  とおくと、

$$\begin{aligned} Z_2 &= Z_p \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \quad (6) \\ &= Z_p \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \cdot \frac{1 - \frac{1}{j\omega T_2}}{1 - \frac{1}{j\omega T_2}} \\ &= Z_p \frac{1 - \frac{1}{j\omega T_2}}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}} \\ &= Z_p \frac{1 + j\frac{1}{\omega T_2}}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}} \quad (7) \end{aligned}$$

この式には、負荷インピーダンスの絶対値と、電流と電圧の位相の関係が含まれています。

まず、負荷インピーダンス  $Z_2$  の絶対値に注目します。

$$|Z_2| = Z_p \left| \frac{1 + j\frac{1}{\omega T_2}}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}} \right| = Z_p \frac{\sqrt{1^2 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}} = Z_p \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}} \quad (8)$$

ここで、周波数が高くなる ( $\omega \rightarrow \infty$ ) と、根号の中の分数の分母が無大となり、インピーダンスは  $Z_p$  となります。 $\omega = 1/T_2 = Z_p/L_p$  のとき、根号の中の分数が 1 となり、インピーダンスは  $Z_p/\sqrt{2}$  (-3 dB) となります。

$Z_p = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $L_p = 22 \text{ H}$  の場合の、負荷インピーダンスの周波数特性を図 2 に示します。

次に、位相について検討します。電圧  $e_o$  は、プレート電流  $i_p$  よりも、

$$\theta = \arg Z_2 = \tan^{-1} \frac{\Im Z_2}{\Re Z_2} = \tan^{-1} \frac{1}{\omega T_2} \quad (9)$$

だけ進んでいます。

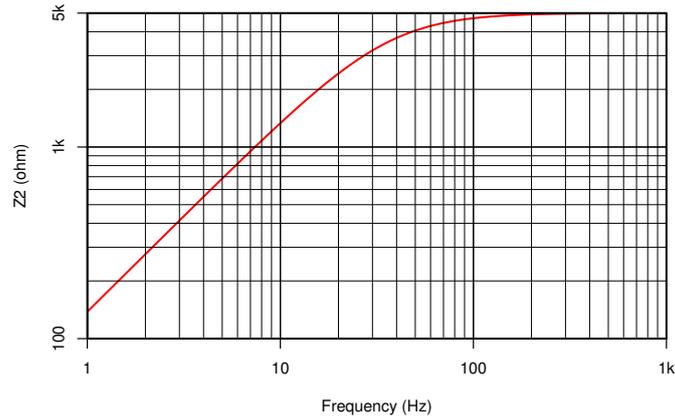


図 2: 負荷インピーダンスの周波数特性

## 2 低域のロードライン

まず、小信号の場合を考えます。この場合、一定のグリッド入力を加えると  $e_i$  が一定となります。プレート電流は、式 (3) より、

$$i_p = \frac{e_i}{Z_1} \quad (10)$$

ですから、 $Z_1$  の値によって変化します。

$Z_1$  の値を求めます。

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_p + Z_{L_p} // Z_p \\ &= r_p + \frac{j\omega L_p Z_p}{j\omega L_p + Z_p} \\ &= \frac{r_p(j\omega L_p + Z_p) + j\omega L_p Z_p}{j\omega L_p + Z_p} \\ &= \frac{j\omega L_p(r_p + Z_p) + r_p Z_p}{j\omega L_p + Z_p} \\ &= \frac{r_p Z_p}{Z_p} \cdot \frac{1 + j\omega L_p \frac{r_p + Z_p}{r_p Z_p}}{1 + j\omega \frac{L_p}{Z_p}} \\ &= r_p \frac{1 + j\omega \frac{L_p}{r_p // Z_p}}{1 + j\omega \frac{L_p}{Z_p}} \end{aligned}$$

ここで、 $T_1 = L_p / (r_p // Z_p)$  とおくと、

$$\begin{aligned} Z_1 &= r_p \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2} \quad (11) \\ &= r_p \frac{j\omega T_1 (1 + \frac{1}{j\omega T_1})}{j\omega T_2 (1 + \frac{1}{j\omega T_2})} \\ &= r_p \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= r_p \frac{\frac{L_p}{r_p/Z_p}}{\frac{L_p}{Z_p}} \cdot \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \\
&= r_p \frac{Z_p}{r_p/Z_p} \cdot \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \\
&= r_p \frac{Z_p(r_p + Z_p)}{r_p Z_p} \cdot \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \\
&= (r_p + Z_p) \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \tag{12}
\end{aligned}$$

周波数が低いときは，式 (11) の分子，分母とも 1 となるので， $Z_1 \rightarrow r_p$  となります．周波数が  $1/2\pi T_1$  を超えるとインピーダンスが 6 dB/oct で上昇を始め， $1/2\pi T_2$  で上昇は止まり，式 (12) より  $Z_1 \rightarrow r_p + Z_p$  となります．

プレート電流で考えると，周波数が低い時は  $i_p \rightarrow e_i/r_p$  の電流が流れ，周波数が  $1/2\pi T_1$  を超えるとプレート電流が 6 dB/oct で減り始め， $1/2\pi T_2$  で下降は止まり， $i_p \rightarrow e_i/(r_p + Z_p)$  となります．

$Z_1$  の絶対値は，

$$\begin{aligned}
|Z_1| &= (r_p + Z_p) \left| \frac{1 + \frac{1}{j\omega T_1}}{1 + \frac{1}{j\omega T_2}} \right| \\
&= (r_p + Z_p) \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}} \tag{13}
\end{aligned}$$

したがって，

$$\begin{aligned}
|i_p| &= \left| \frac{e_i}{Z_1} \right| \\
&= \frac{|e_i|}{r_p + Z_p} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}} \tag{14}
\end{aligned}$$

図 3 に総インピーダンス  $Z_1$  の周波数特性を，図 4 にプレート電流の周波数特性を示します．真空管の内部抵抗  $r_p$  は，1 k $\Omega$  (赤)，5 k $\Omega$  (青)，20 k $\Omega$  (緑) の 3 通りを示しています．プレート電流は， $e_i = 1$  V として計算しています．

OPT 一次側の電圧  $e_o$  は，式 (5) より，

$$\begin{aligned}
|e_o| &= |Z_2| \cdot |i_p| = Z_p \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}} \cdot \frac{|e_i|}{r_p + Z_p} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}} \\
&= \frac{Z_p}{r_p + Z_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}} |e_i| \tag{15}
\end{aligned}$$

これが，小信号時の周波数特性で，カットオフ周波数が  $1/T_1$  のハイパス特性となります<sup>1</sup>．図 5 に OPT 一次電圧の周波数特性を示します．

<sup>1</sup>この式は，式 (4) を直接変形しても得られますが，ここではロードラインを引くという観点から  $e_o$  と  $i_p$  の関係から導いています．

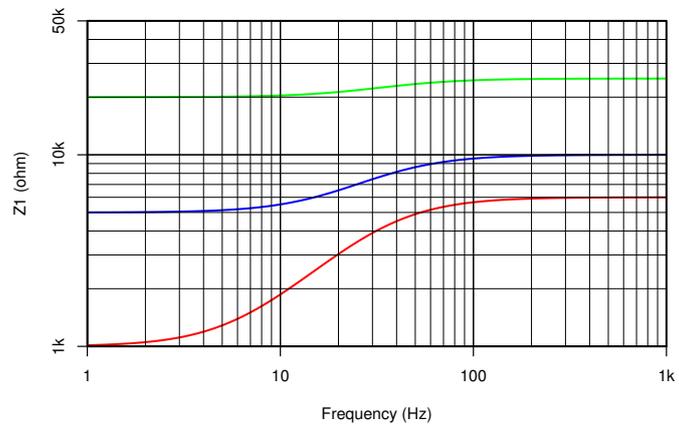


図 3: 総インピーダンスの周波数特性

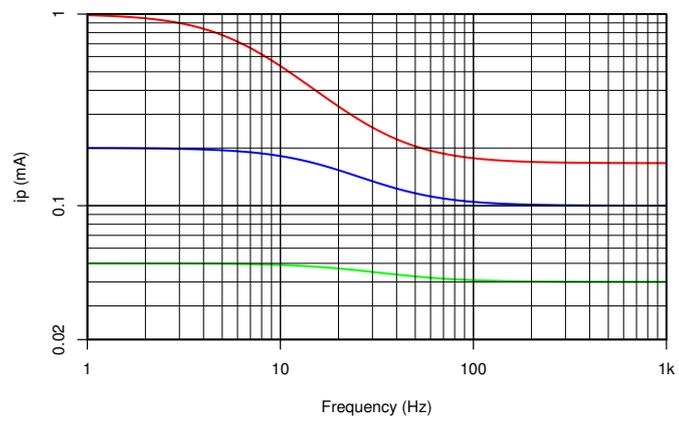


図 4: プレート電流の周波数特性

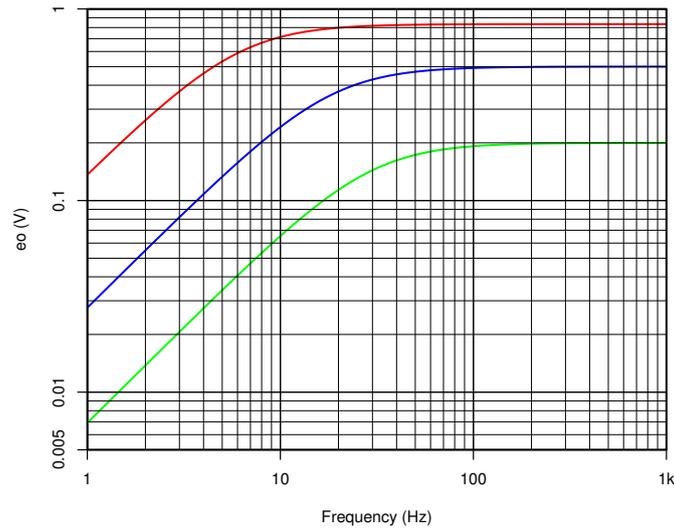


図 5: OPT 一次電圧の周波数特性

出力管の内部抵抗が低いほど  $T_1$  が大きくなり、周波数特性は低域まで伸びますが、 $1/2\pi T_2$  より低い周波数では、プレート電流が増えていることに注意してください。

さて、各周波数に対するプレート電圧の振幅とプレート電流の振幅と、その間の位相がわかったので、ロードラインを描くことができます。プレート電流の位相を基準とすると、

$$i_p = |e_i| \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}}{(r_p + Z_p) \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}} \sin a \quad (16)$$

$$e_o = |e_i| \frac{Z_p}{r_p + Z_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_1^2}}} \sin a + \theta \quad (17)$$

という関係になりますから、 $a$  を 0 から  $2\pi$  まで変化させてやると、一周期のロードラインが描けます。 $\theta$  は、式 (9) のものです。 $i_p$  の符号を反対にとったので、描くときに反転してやります。

図 6 に、 $r_p = 1\text{ k}\Omega$  の場合のロードラインを示します。周波数が高い場合は、形状が斜めの直線に近くなります。これが通常のロードラインで、傾きは  $1/Z_p$  です。周波数が低くなるとロードラインは楕円になり、しかも縦方向に伸びていきます。

### 3 最大出力時に何が起こるか

前節のロードラインに、静止時のプレート電圧、プレート電流を加えてやれば、実際のロードラインとなります。ここでは、静止時のプレート電圧を  $E_{p0} = 450\text{ V}$ 、プレート電流を  $I_{p0} = 80\text{ mA}$  としてみます。ここで  $Z_p = 5\text{ k}\Omega$  のロードラインを引いてやると、 $y$  軸との交点は、

$$E_{p0} + I_{p0} Z_p = 450 + 0.08 \times 5000 = 850\text{ [V]} \quad (18)$$

となります。

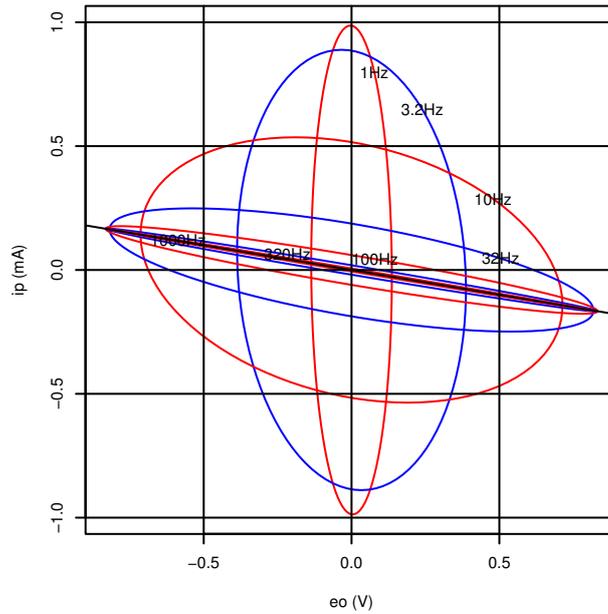


図 6: 小信号時のロードラインの例

中域での最大出力時の OPT 一次電圧の波高値は  $I_{p0}Z_p = 400\text{ V}$  です．このときの  $e_i$  は，

$$e_{i\max} = \frac{r_p + Z_p}{Z_p} e_{o\max} \quad (19)$$

で， $r_p = 1\text{ k}\Omega$  とすれば， $e_{i\max} = 480\text{ V}$  です．

これらの条件から，中域で最大出力となるグリッド入力を加えたときのロードラインを描くと，図 7 のようになります．

周波数が低い場合，プレート電流が負になってしまう部分が出てきます．当然のことながら，プレート電流は負になれませんから，カットオフの状態になり，大きな歪みが発生してしまいます．プレート電流が大きくなる方に関しては，三極管ならプレート特性曲線が立っているため，ある程度は流すことができるでしょう．五極管の場合，プレート特性曲線がほとんど水平なので，クリップが起こるでしょうが，それよりも先にプレート電流が 0 になるでしょう．したがって，ノンクリップの最大出力を制限するのは，プレート電流が正でなければならないという条件になります．

プレート電流の瞬時値が 0 に達した時，プレート電流の信号成分の波高値は  $I_{p0}$  となっています．この条件を式 (5) に入れてやれば，

$$\begin{aligned} |e_{o\max}| &= |Z_2 I_{p0}| \\ &= I_{p0} Z_p \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}} \end{aligned} \quad (20)$$

ロードラインの軌跡を描くには，

$$i_p = I_{p0} \sin a \quad (21)$$

$$e_o = I_{p0} Z_p \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}}} \sin a + \theta \quad (22)$$

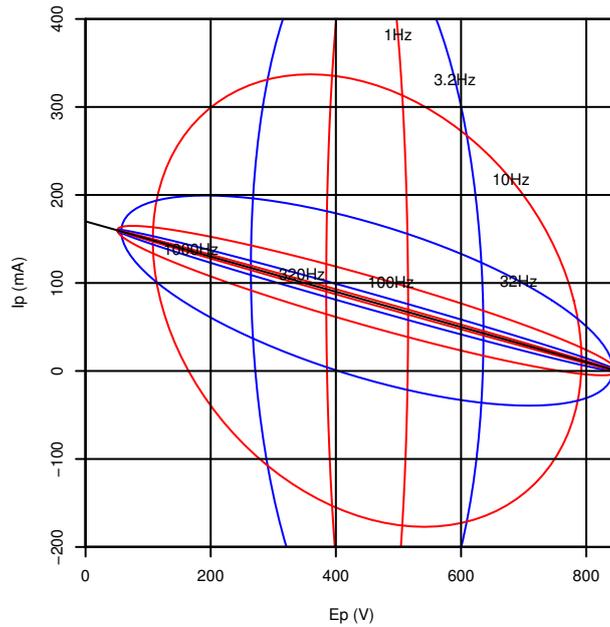


図 7: 最大出力時のロードラインの例

という関係を使います．このようにして描いたノンクリップ最大出力時のロードラインは図 8 のようになります．

この時の出力電力は  $e_{o\max}$  から求められ，

$$P_{o\max} = \frac{|e_{o\max}|^2}{2Z_p} = \frac{I_{p0}^2 Z_p}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\omega^2 T_2^2}} \quad (23)$$

となります．これをグラフで表すと，図 9 のようになります．この式からわかるように，出力が理論的な最大出力  $I_{p0}^2 Z_p / 2$  の半分になるのは，周波数が  $1/2\pi T_2$  のときです．

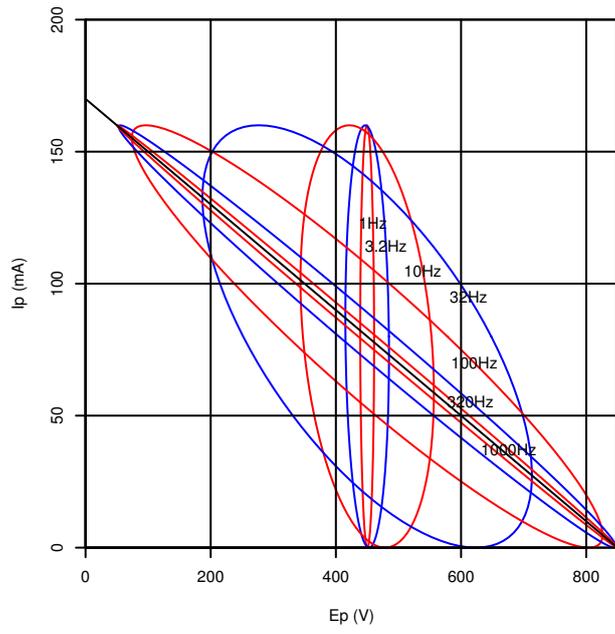


図 8: ノンクリップ最大出力時のロードラインの例

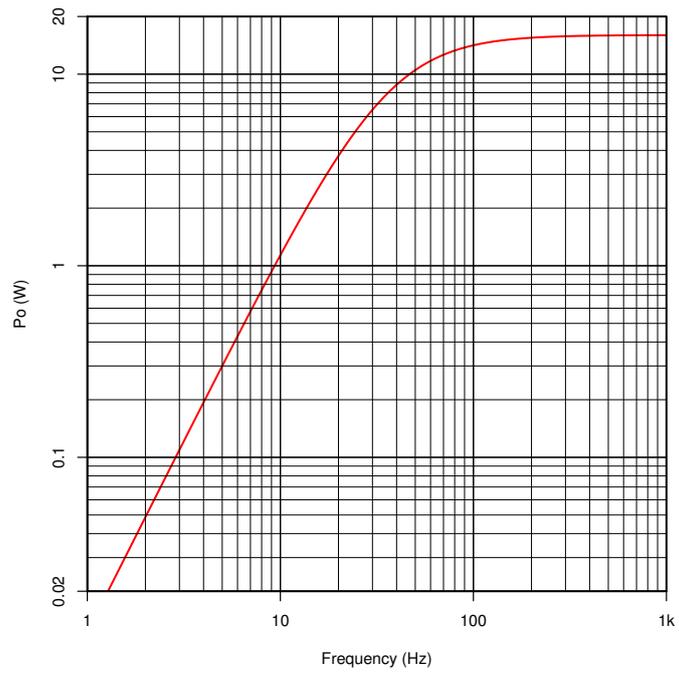


図 9: ノンクリップ最大出力の周波数特性