

低いプレート電圧に対する真空管の SPICE モデリング

五極管の三極管結合と三極管に対する特性の比較

有村 光晴[†]

[†] 湘南工科大学工学部 〒251-8511 神奈川県藤沢市辻堂西海岸 1-1-25

E-mail: †arimura@m.ieice.org

あらまし 真空管の Ep-*I*_p 特性を実測し、低いプレート電圧 (10V から 30V 程度) に対する特性を作成する。実測した Ep-Eg-*I*_p 特性に対して Cohen-Hélie モデルを非線形最小二乗法でフィッティングすることで、実測したデータに比較的一致する特性曲線を描画する。五極管を三極管接続したものと三極管に対してこの特性を実測した。この実験により、低いプレート電圧においても良好な特性が得られることが明らかになった。この程度のプレート電圧における真空管の特性はデータシートから読み取ることができないため、低いプレート電圧に対する真空管の動作特性のモデル作成として意味がある。また、10V から 30V 程度における特性が明らかになったことで、オーディオ以外の目的に真空管を使用する際の設計が可能になったこと、SPICE モデルを作成できたことで、SPICE シミュレーター上で設計が可能になったことが利点として挙げられる。

キーワード 真空管, 低電圧特性, Ep-*I*_p 特性, SPICE モデル, 非線形最小二乗法

SPICE Modeling of Vacuum Tubes for Low Plate Voltage

Comparison of Characteristics for Triode Connection of Pentodes and Triodes

Mitsuharu ARIMURA[†]

[†] Faculty of Engineering, Shonan Institute of Technology 1-1-25 Tsujido-Nishikaigan, Fujisawa-shi, Kanagawa, 251-8511 Japan

E-mail: †arimura@m.ieice.org

Abstract We measured the Ep-*I*_p characteristics of vacuum tubes and created SPICE models for low plate voltages (about 10V to 30V). By fitting the Cohen-Hélie model to the measured Ep-Eg-*I*_p characteristics using a nonlinear least-squares method, a model curve that relatively matches the measured data is drawn. The characteristic is measured for pentode tubes with triode connection and triode tubes. This experiment revealed that good characteristics can be obtained even at low plate voltages. Since the characteristics of vacuum tubes at this level of plate voltage cannot be read from data sheets, it is meaningful to create a model of vacuum tubes at low plate voltages. Another advantage is that the clarification of the tube model at low voltage from 10V to 30V enables the use of vacuum tubes for purposes other than the audio circuit.

Key words Vacuum Tube, Low Voltage Characteristics, Ep-*I*_p Characteristics, SPICE Model Non-Linear Least-Square Method

1. ま え が き

真空管は 200V から 400V 程度の電源電圧を用いて、オーディオアンプやラジオなどの回路に用いられていた。しかし、トランジスタやダイオードなどの半導体部品が実用化されたことにより、現在はほとんどの場所で真空管はこれらの部品に置き換えられている。真空管は電球のように真空のガラス管の中に電子回路を組んでいるため、ガラス管の破損による故障や、内部

の金属からのガスの放出による真空度の低下による寿命が避けられないという欠点がある。また、200V から 400V という高電圧を使用するため、使用できるアプリケーションにも制限が出てしまうという欠点が存在する。

現在、KORG 社から Nutube 6P1 [12] という真空管が発売されている。これは蛍光表示管の技術を基礎とした真空管であり、5V という低電圧から使用可能であるとうたわれている。また、真空管 ECC88 (6DJ8) を 12V で動かす YAMA amp [13] と呼ば

れるヘッドフォンアンプが発表され、12V という電圧でも真空管が動作可能であることが明らかになった。

これを動機として著者 [14], [15] は、6AS5 という電力増幅用五極管を三極管接続したものに対して 20V 程度までの E_p - E_g - I_p 特性が計測した。Cohen-Hélie モデル [11] にフィッティングさせて 10V から 30V 程度の電圧で使用可能な SPICE モデルを作成した。この実験により、比較的内部抵抗の低い電力増幅管であれば、良い特性が得られることが明らかになった。

本稿では、様々な真空管に対して E_p - E_g - I_p 特性を計測し、同様に真空管の SPICE モデルを作成する。特性を計測する真空管としては、12AU7, 6DJ8, 6AK5 などの現在も新品が発売されているものを選んだ。また、五極管やビーム管については三極管結合の特性を計測し、通常の三極管とは特性の傾向に違いが出ることを確認した。

本稿の構成を以下に示す。2 節では、三極真空管の構造と動作の仕組みについて解説し、本稿で用いる真空管のモデルである Cohen-Hélie モデルを示す。3 節では、いくつかの真空管に対してプレート電圧の小さい領域で E_p - I_p 特性を計測してプロットし、さらに Cohen-Hélie モデルを非線形最小二乗法でフィッティングすることで、真空管の特性モデルを表す数式を作成する。4 節では、3 節で作成したモデルを LTspice に取り込んで、改めて E_p - I_p 特性をプロットする。5 節では、五極管を三極管結合して用いたものと三極管の違いを比較する。6 節では本稿のまとめと今後の展望を示す。

2. 三極真空管

本節では、まず三極真空管の構造と動作の仕組みについて解説する。その後、プレートおよびグリッドに掛ける電圧と、プレートからカソードに向かって流れるプレート電流のモデルとして本稿で用いる Cohen-Hélie モデルについて述べる。

2.1 三極真空管の構造と動作の仕組み

三極真空管は直熱管と傍熱管が存在する。

直熱三極真空管の構造は図 1 のように、アノード、グリッド、フィラメントから成る。

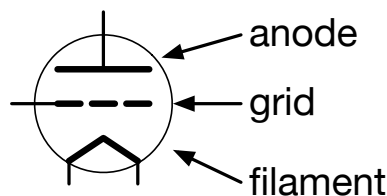


図 1 直熱三極管の構造

傍熱三極真空管の構造は図 2 のように、プレート、グリッド、カソード、ヒーターから成る。傍熱管では、フィラメントから直接熱電子を放出させずに、ヒーターでカソードを加熱して、カソードから熱電子を放出させる点が直熱管と異なる。以下では、カソードの電位を 0V とする。

傍熱三極管の動作原理は以下のとおりである。ヒーターに数ボルトの電圧を掛けて加熱すると、カソードから熱電子が放出

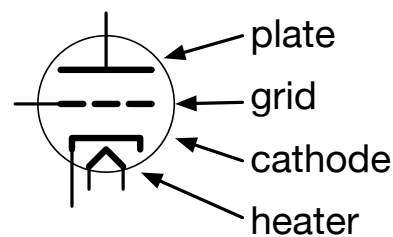


図 2 傍熱三極管の構造

される。プレートに正の電圧 E_p (V) を掛けると、この熱電子がプレートに吸い込まれる。これは、プレートからカソードに向かって電流が流れることに相当する。この電流をプレート電流 I_p (A) と呼ぶ。このとき、グリッドに負の電圧 E_g (V) を掛けると、カソードからプレートに飛んでいる熱電子の流れが阻害されるため、プレートからカソードに流れる電流の量が減少する。よって、グリッドに掛ける電圧を増減させることで、プレートからカソードに流れる電流を制御することができる。プレートと電源の + 端子の間に負荷抵抗 R を挟むと、ここに流れる電流 I_p が負荷抵抗の電圧降下 $R \times I_p$ (V) となるため、電流の増減を負荷抵抗のプレート側の端子の電圧の増減として取り出すことができる。

これをグラフに表すと図 3 のようになる。

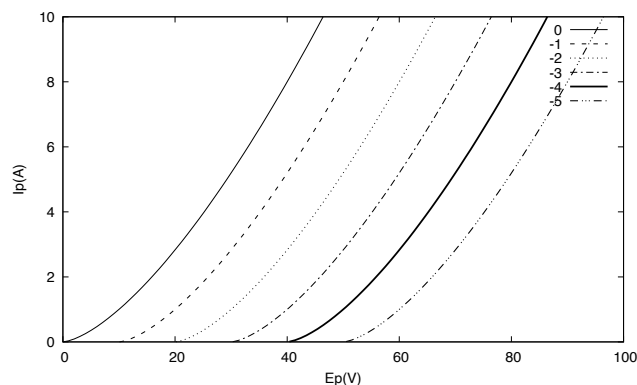


図 3 三極管の基本的な特性グラフ

グラフの縦軸はプレート電流 I_p で、横軸はプレートの電圧 E_p である。各曲線はグリッドの電圧 E_g をそれぞれ固定したもので、グリッド電圧を負の方向に大きくすると、流れる電流が減少するため、グラフは右下にずれる。

2.2 真空管の E_p - I_p 特性の計測

真空管のプレート電圧 E_p とグリッドバイアス電圧 E_g を指定してプレート電流 I_p を計測するには、次のような配線を行なう。

まず三極管の場合の配線を図 4 に示す。カソードを基準としてグリッドとプレートに電圧を掛ける。ただしグリッドに掛ける電圧は負の電圧とする。このとき、プレートに流れ込む電流を計測する。

次に五極管の場合の配線を図 5 に示す。五極管の多くはサブレッサグリッド G3 がカソードに内部で接続されている。内部で接続されていない真空管については外部で接続して計測す

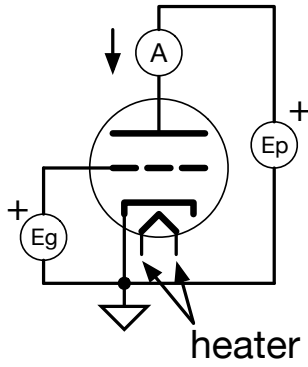


図4 Ep-Ip 特性の計測 (三極管)

る。また、五極管を三極管接続するために、スクリーングリッド G2 をプレートに接続する。

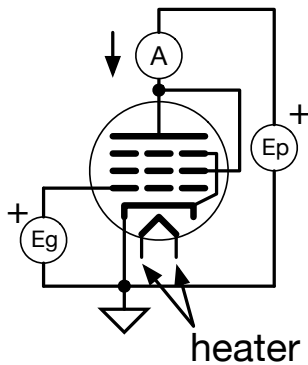


図5 Ep-Ip 特性の計測 (五極管の三極管接続)

プレートおよびグリッドのための電源は高砂製作所社製 KX-100L (最大出力電圧 40V, 出力電圧分解能 10mV) を、プレート電流を計測するための電流計は ADVANTEST 社製デジタルマルチメーター R6441D (直流電流分解能 10nA) を用いた。また、ヒーターの電源は 6.3V のトランスを用い、100V から変換した 6.3V の交流電圧を直接用いた。

2.3 SPICE シミュレーションのための三極真空管の特性モデル

前節の図3に示したような特性曲線は、実測したものが真空管のデータシートに掲載されているが、これを数式でモデル化する試みが成されてきている。古来、二極管に対する 3/2 乗則のモデルが Langmuir (cf. [1]) によって提案されており、後に Perugini [2] によって指数部を 3/2 に固定するのではなく、一般の実数パラメータとするモデルが提案されている。

三極管のモデルは、Leach [3], Rydel [4], [5] (cf. [6]), 中村 [7], Koren [8], [9] (cf. [10]), Cohen-Hélie [11] らによって提案されている。

これらの数式による真空管の特性モデルの作成は、主に SPICE 内で使うためのものであるため、提案された時期は真空管が既に主要な電子部品ではなくなっている 1990 年代以降と新しいのが特徴である。

2.4 本稿で用いる真空管のモデル (Cohen-Hélie モデル)

本節では、本稿で用いる Cohen 氏と Hélie 氏によって提案さ

れたモデル (Cohen-Hélie モデル [11] と呼ぶ) を示す。

三極管に対する Cohen-Hélie モデルは以下の式で表される。

$$I_p = \frac{2}{k_g} \text{uramp}(E_1)^x$$

$$E_1 = E_p \cdot F\left(\frac{1}{\mu} + \frac{E_g + e_{ct}}{f(E_p)}, k_p\right)$$

$$f(E_p) = \sqrt{e_{vb} + E_p^2 + e_{vb2}E_p}$$

$$I_g = F(a(E_g + e_\phi), 1)^\gamma \left(\frac{1}{bE_p + 1} + \frac{1}{c}\right)$$

$$F(x, a) = \frac{1}{a} \log(1 + \exp(ax))$$

E_p がプレート電圧, E_g がグリッド電圧, I_p がプレート電流, I_g がグリッド電流である。真空管に依存するパラメータは $k_g, x, \mu, k_p, e_{ct}, e_{vb}, e_{vb2}$ の 7 個である。対数関数 \log および指数関数 \exp の底は e である。

ここで, $\text{uramp}()$ 関数は SPICE に組み込まれている関数で、以下の式で表される。

$$\text{uramp}(x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0, \\ 0 & \text{if } x \leq 0, \end{cases}$$

また、関数 $F(x, a) = \frac{1}{a} \log(1 + \exp(ax))$ は、グラフに描くと図6のようになる。

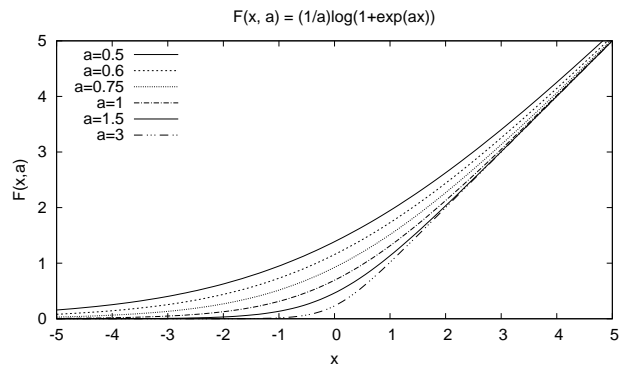


図6 $F(x, a) = \frac{1}{a} \log(1 + \exp(ax))$ のグラフ

この関数は、 $x \rightarrow \infty$ のとき $F(x) = x$ に、 $x \rightarrow -\infty$ のとき $F(x) = 0$ に漸近する。よって、関数 $F(x) = \max\{x, 0\}$ が $x = 0$ において折れ線になっているのを、この近くで曲線に直したものである。 $y = \max\{x, 0\}$ のグラフを図7に示す。

また、関数 $F(x, a)$ の $x = 0$ のときの値は $(\log_e 2)/a$ となり、パラメータ a によって $x = 0$ の近くでの曲線の曲がり具合が調整されている。図6では、 $a = 0.5, 0.6, 0.75, 1, 1.5, 3$ と変化させて $F(x, a)$ のグラフをプロットしている。 a の値が大きくなるにつれて、 $y = \max\{x, 0\}$ のグラフに近づいていることがわかる。

関数 $F(x, 1) = \log(1 + \exp(x))$ はソフトプラス関数と呼ばれている。また、関数 $F(x, 1)$ を x で微分した $F'(x, 1) = 1/(1 + \exp(-x))$ はシグモイド関数となる。

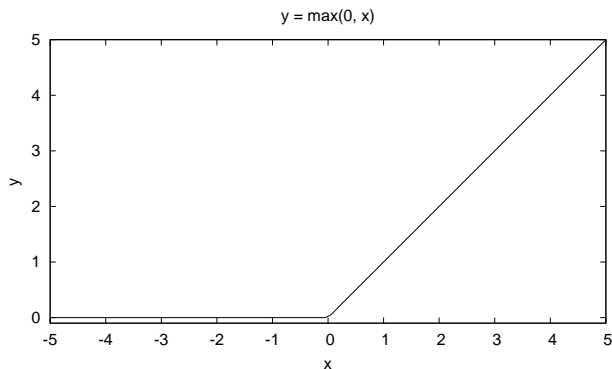


図7 $y = \max\{x, 0\}$ のグラフ

3. いくつかの真空管に対する特性計測とフィッティング

本節では、さまざまな真空管に対して、グリッドのバイアス電圧 E_g をいくつかの値に固定して、プレート電圧 E_p を 0V から 20V まで変化させながら、プレート電流 I_p を計測した結果を示す。さらに、Cohen-Hélie モデルをこのデータに非線形最小二乗法でフィッティングさせた結果も一緒にプロットする。

3.1 双三極管の特性

まず双三極管に対する計測データとフィッティングした結果を示す。点で示してあるものが計測データであり、曲線で示してあるものが、Cohen-Hélie モデルをフィッティングしたものである。ここでは、6DJ8, 12AU7, 396A に対して計測したデータをそれぞれ図 8, 図 9, 図 10 に示す。

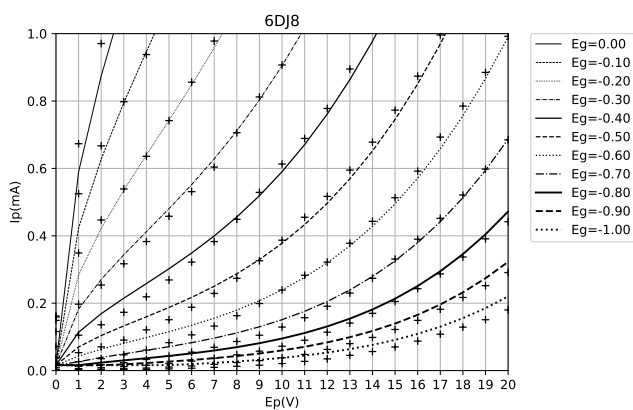


図8 6DJ8(東芝)

3.2 五極管の特性

次に、五極管に対する計測データとフィッティングの結果を示す。ここでは、6AK5, 6AQ5, 6AS5 に対するデータをそれぞれ図 11, 図 12, 図 13 に示す。

本稿では五極管を全て三極管結合して用いることで、五極管を三極管結合して用いたときに、三極真空管とどのように特性が異なるかを比較する。6AK5 のプレート抵抗はかなり高いが、6AQ5 および 6AS5 は電力増幅管として用いられる真空管のた

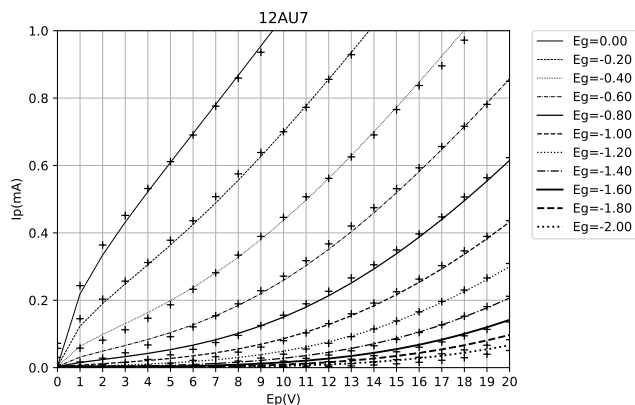


図9 12AU7(東芝)

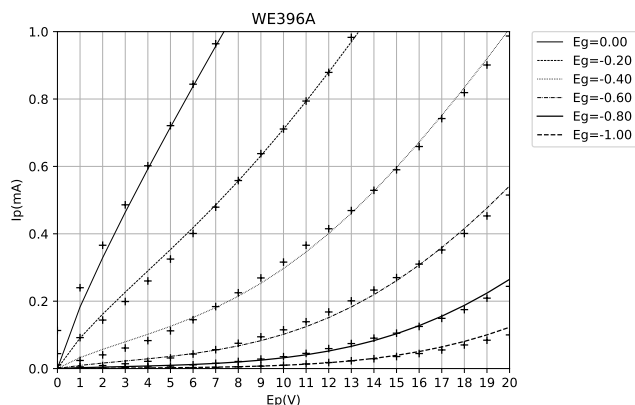


図10 396A(Western Electric)

め、プレート抵抗が低い。

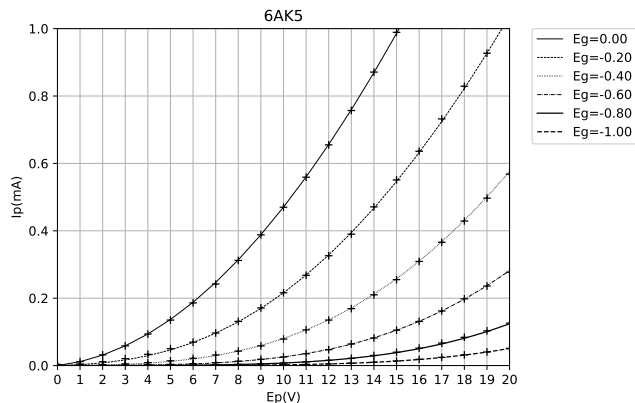


図11 6AK5(東芝)

4. 作成したモデルによる特性のプロット

本節では、前節でフィッティングして作成した真空管のモデルを LTspice に組み込んで、改めて E_p - I_p 特性をプロットする。双三極管と五極管に分けて示す。

4.1 双三極管のモデルによるプロット

作成した双三極管のモデルを用いて E_p - I_p 特性をプロットした結果を示す。6DJ8, 12AU7, 396A の特性をそれぞれ図 14, 図 15, 図 16 に示している。

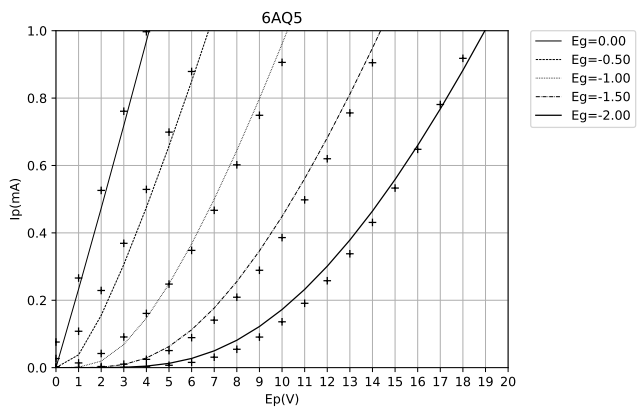


図 12 6AQ5

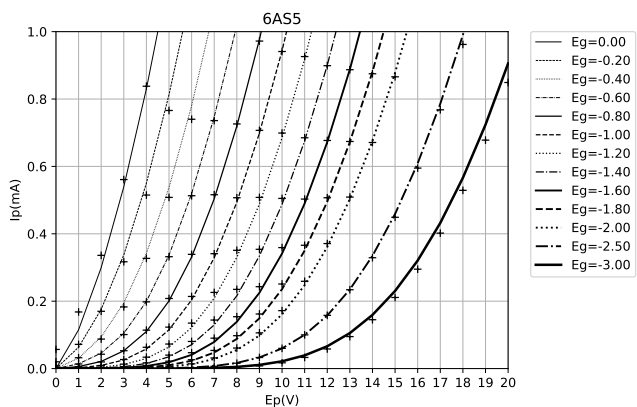


図 13 6AS5

横軸はプレート電圧 E_p であり、全て 0V から 30V までの範囲に固定してある。縦軸はプレート電流 I_p であり、真空管のプレート電流の流れ具合に合わせて変化させている。

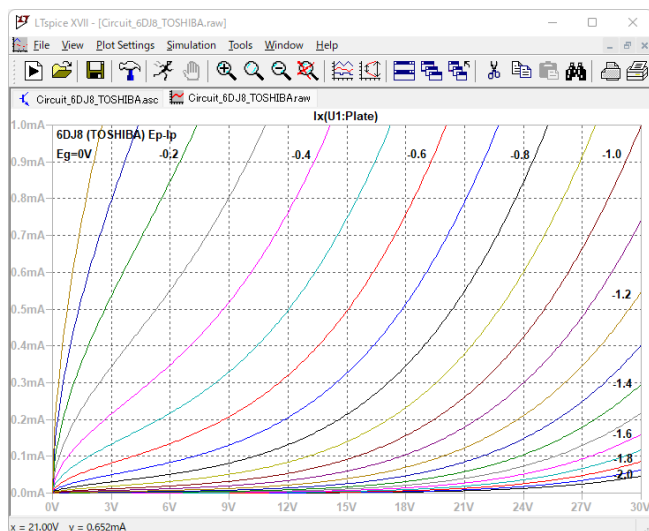


図 14 6DJ8(東芝)

4.2 五極管 (三極管結合) のモデルによるプロット

次に、作成した五極管のモデルを用いて E_p - I_p 特性をプロットした結果を示す。6AK5, 6AQ5, 6AS5 の特性をそれぞれ図 17, 図 18, 図 19 に示している。

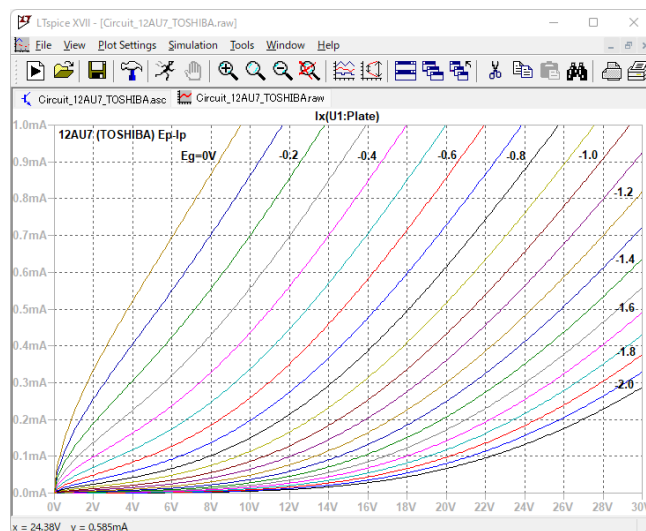


図 15 12AU7(東芝)

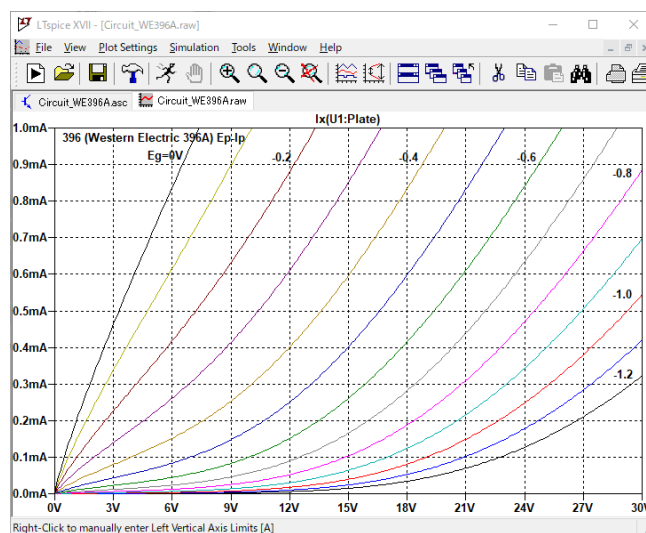


図 16 396A(Western Electric)

横軸は前節のグラフと同じくプレート電圧 E_p であり、ここでは全て 0V から 30V までの範囲に固定してある。縦軸はプレート電流 I_p であり、真空管のプレート電流の流れ具合に合わせて変化させている。6AQ5 と 6AS5 は電力増幅管なので、最大値 2mA でプロットしている。

5. 五極管の三極管接続と三極管の比較

本節では、五極管を三極管接続して三極管として用いたものと、三極管の特性の違いについて述べる。

三極管においては、グリッドバイアス電圧 E_g を一つに固定してプレート電圧 E_p を変化させてプレート電流 I_p を計測してグラフにプロットしたとき、 E_p の小さい部分で曲線が上に凸となる部分があり、ある程度 E_p が大きくなると、下に凸となって I_p が上昇していく。

これに対し、五極管の三極管結合においては、 E_g をある値に固定したとき、グラフが全て下に凸の状態では、 E_p を大きくするにつれて I_p が増加する。

これらの比較により、プレート電圧 E_p がごく低い領域にお

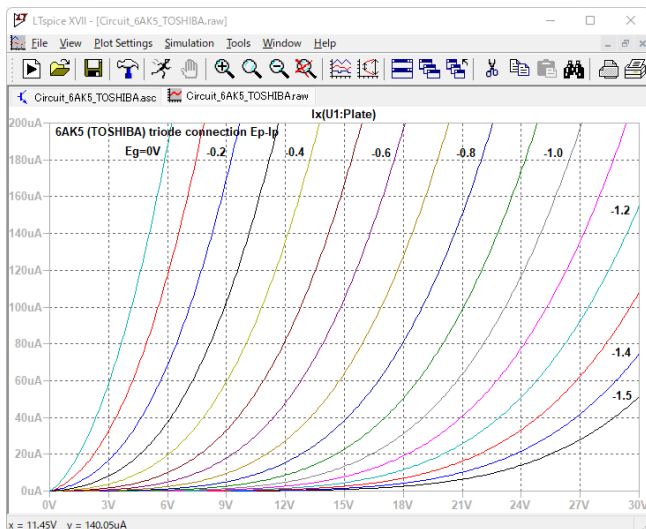


図 17 6AK5(東芝)

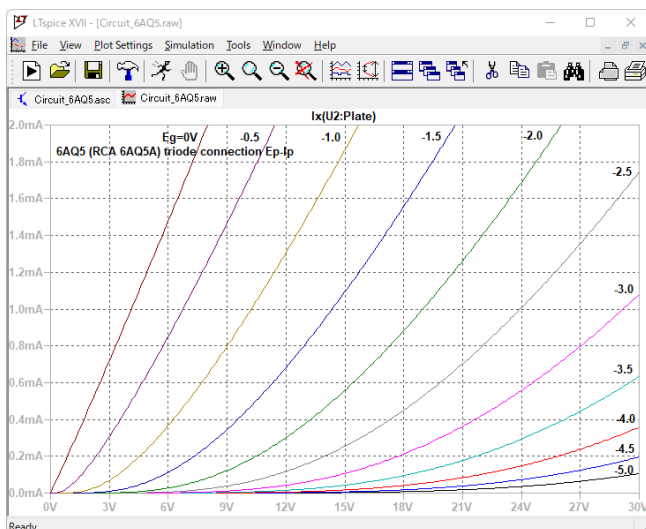


図 18 6AQ5

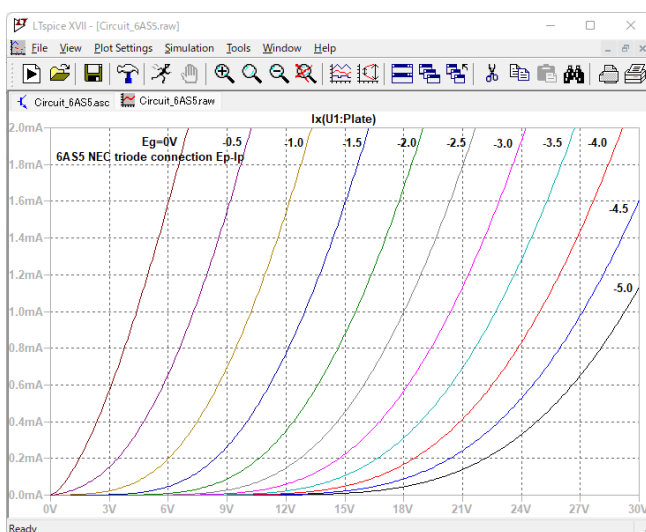


図 19 6AS5

いては、三極管よりも五極管を三極管結合して使用したほうが、理想的な三極管の特性に近いことが分かる。よって、このよう

な状況では、五極管の三極管結合を用いる理由が存在する。

6. ま と め

本稿では、各種の真空管に対し、10V から 30V 程度のプレート電圧での特性を計測し、Cohen-Hélie モデルに非線形最小二乗法でフィッティングしてモデルを作成した。さらに、作成したモデルを LTspice に組み込み、このモデルにもとづく Ep- I_p 特性をプロットした。このとき、グリッドバイアス電圧 E_g の変化に対してだいたい等間隔の特性曲線がプロットされた。これにより、このような低いプレート電圧およびプレート電流の範囲で、比較的特性が良く、十分実用になることを示すことができた。これだけのバリエーションの真空管に対してこのような特性が得られたことから、ここで示した真空管以外にも、さまざまな真空管で、10V から 30V のプレート電圧、100 μ A から 1mA 程度の範囲で動作させることで、200V から 400V という高いプレート電圧を使わなくても実用的な特性が得られると考えられる。

文 献

- [1] 宮脇一男, 真空管回路 (上, 下), 電気書院, Sept. 1961.
- [2] Stefano Perugini, "Vacuum Diode Models ans PSpice Simulations," *Glass Audio*, Vol.10, No.4, 1998.
- [3] W. Marshall Leach, Jr, "SPICE Models for Vacuum-Tube Amplifiers," *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.43, No.3, p.117, March, 1995.
- [4] Charles Rydel, "Simulation of Electron Tubes with Spice," *Proceedings of the 98th Audio Engineering Society Convention*, Paris, Feb.25-28, 1995.
- [5] Charles Rydel, "Comments on "Spice Models of Vacuum-tube Amplifiers"," *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.45, No.6, pp.491-494, June 1997.
- [6] EXCEM S.A. Ed., *Vacuum Tube Modeling Package Vol. 1 User's Guide*, 1995 (electronic edition, 2000).
- [7] 中村 歩, 電脳時代の真空管アンプ設計, June 2003, <http://ayumi.cava.jp/audio/index.html>, 2022 年 5 月 29 日閲覧。
- [8] Norman Koren, "Improved Vacuum Tube Models for SPICE Simulations," *Glass Audio*, Vol.8, No.5, p.18, 1996.
- [9] Norman Koren, "Improved Vacuum Tube Models for SPICE Simulations," 2001, Part 1: http://www.normankoren.com/Audio/Tubemodspice_article.html, Part2: http://www.normankoren.com/Audio/Tubemodspice_article_2.html, 2022 年 5 月 29 日閲覧。
- [10] Nicholas Lynar, "Digital Audio Systems: Written Review 2 — Digital Tube Simulation Models—," DESC9115: Digital Audio Systems, University of Sydney, Sept. 2013.
- [11] Ivan Cohen and Thomas Hélie, Measures and Models of Real Triodes, For the Simulation of Guitar Amplifiers, *Proc. of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, pp. 1191-1196, Nantes, France, Apr. 23-27, 2012.
- [12] ~ 蛍光表示管技術を応用した新真空管 ~ KORG Nutube, <https://korgnutube.com/jp/>, 2022 年 5 月 29 日閲覧。
- [13] The YAHA Amp (Yet Another Hybrid Amp), <http://www.fa-schmidt.de/YAHA/>, 2022 年 5 月 29 日閲覧。
- [14] 有村光晴, "低プレート電圧における三極真空管のモデリングと LTspice モデルの作成," 電子情報通信学会技術研究報告, No. CAS2019-11, pp. 43-48, 岩手大学, July 30-31, 2019.
- [15] 有村光晴, "低電圧でモデリングされた LTspice 上の真空管アンプによるサウンドデータの再生音の評価," 日本音響学会音楽音響研究会資料, Vol. 38, No. 4, MA2019-19, pp. 13-18, 明星大学, July 13, 2019.