

# 小信号増幅回路の交流等価回路について

— 記述調査と新解釈法の提案 —

青木博夫\*

## AC Equivalent Circuit of a Small Signal Amplification Circuit —Investigation of Description and a Proposal of New Interpretation—

AOKI Hiroo

In an electrical and electronic department, electronic circuit is a basic and important subject next to an electric circuit and electromagnetism. Electronic circuits are classified roughly into analog and digital. There are many students who think that an analog electronic circuit is difficult to learn compared with the digital. It seems that the cause must be from treating the AC and DC circuits at the same time. In particular, it is difficult for them to understand the AC equivalent circuits.

There are few books that describe the AC equivalent circuit easily to understand. So the author has investigated the description about it among the several books and devised the new interpretation with circuit simulator.

キーワード：増幅器，等価回路，電流源，回路シミュレータ

### 1. はじめに

電子回路は電気電子系学科においては、電気回路や電磁気学に次いで重要な基礎科目である。電子回路はアナログとデジタルに大別され、デジタル電子回路、特に論理回路に関しては理解がそれほど難しくはないが、アナログ電子回路が難しいと感じている学生が多い。その原因は、回路内で直流と交流を同時に考えなければならないところにあると思われる。アナログ電子回路の基本である増幅回路で言えば、直流はバイアスに関する部分であり、交流は信号分についての等価回路に関する部分である。この二つを理解して初めて、アナログ電子回路の入門を理解したことになるが、この箇所ですみずく学生が多いと感じている。バイアスに関しては、静特性図と関連させることで比較的説明しやすいが、交流の等価回路に関しては説明し難い部分である。

筆者は交流の等価回路が、そのようになる根拠を十分に説明してある本が非常に少ないのを以前から疑問に感じていた。そこで和書、洋書および訳本からその部分に関する記述を調査し、合わせて回路シミュレータを用いた新しい解釈法を考案したのでここに報告する。

### 2. 記述の調査と分類

アナログ増幅回路で最も代表的な回路は、図1のような電流帰還型共通エミッタ増幅回路であり、またこの回路のトランジスタ部分をhパラメータで表した回路は図2のようになる。さらに中域ではカップリングコンデンサ  $C_i$ ,  $C_o$ , バイパスコンデンサ  $C_1$  が短絡とみなすことができるから、交流等価回路は図3のようになる。なお等価回路では、実際上  $h_{oe}$  と  $h_{re}$  の影響はきわめてすくないので省略してある。図1の増幅回路でバイアスを構成する  $R_1$  と  $R_2$  および出力の  $R_3$  と  $R_4$  が図3では並列になるが、この理解が難しい。そこで内外のアナログ電子回路に関する書物の中で、これに関する記述を調査した結果、次の4種類に分類できることが分かった。なお以下の説明中の抵抗、コンデンサの番号は図1に対応させて置き換えてある。

#### 2-1 天下り式記述または説明が全くないもの

「図xの増幅回路の1段の等価回路は図yのようになる。」<sup>1)</sup>

「図xの増幅回路をh定数等価回路で表すと図yのようになる。」<sup>2)</sup>

交流の等価回路の説明が無く、図が直接出ている<sup>3)</sup>。

#### 2-2 バイアス抵抗または負荷抵抗は並列になるという説明

「トランジスタ入力側の  $R_1$  と  $R_2$  はベースのバイアス抵抗で、 $R_b=R_1/R_2$  は交流分に対しては分路となる。」<sup>4)</sup>

\* 電気電子工学科教授

「交流信号に対しては  $C_o$  は短絡の効果を持つから負荷抵抗  $R_3$  と  $R_4$  は並列合成抵抗となり...」<sup>5)</sup>

2-3 直流電源は短絡できるという説明

「直流電源部分は交流的に短絡であるとする。」<sup>6)</sup>

「There is one guaranteed static DC voltage in the circuit,  $V_{cc}$ . It can be considered to be provided from an enormous precharged capacitor (like a battery) and therefore has negligible AC impedance to ground. To AC signals,  $V_{cc}$  is grounded.

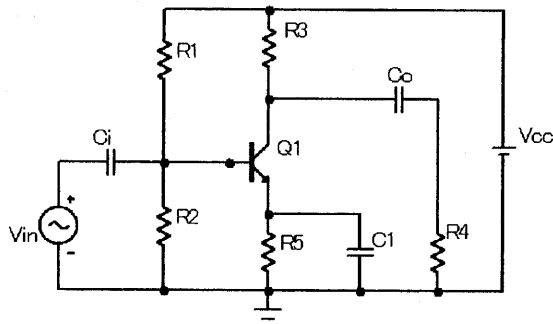


図1 電流帰還型共通エミッタ増幅回路

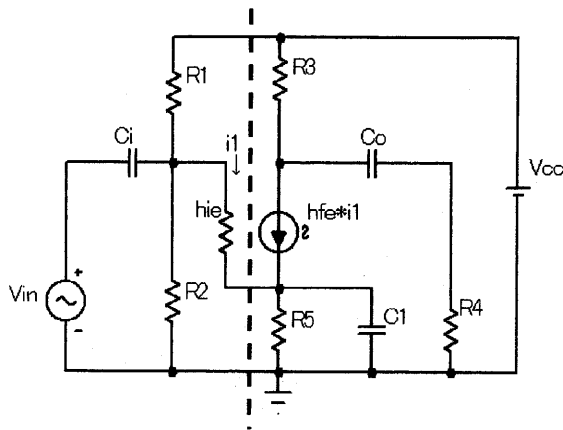


図2 hパラメータを用いた等価回路

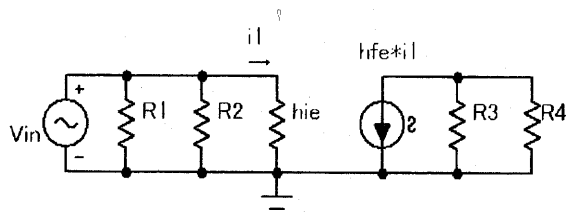


図3 交流等価回路

」<sup>7)</sup> これは、直流電源は巨大な容量のコンデンサとしてしているものである。

2-4 重ね合わせの理を用いて説明

「... 線形動作を仮定しているから、重ね合わせの理を用いて交流と直流の成分は分けて取り扱うことができる。交流成分に対しては電源とコンデンサを短絡することができ...」<sup>8)</sup>

「回路の交流成分のみを考えるときには、重ねの理を根拠として、直流電圧源と交流解析に関係しないコンデンサは短絡して考える。このようにすると図 x に対応する交流等価回路は図 y となる。」<sup>9)</sup>

このように説明の程度に応じて4段階に分類できる。最後の重ね合わせの理を用いて説明されているものが4つの分類の中では最も理にかなない分かりやすいと思われる。

3. 回路シミュレータを用いた解釈法

図3の等価回路では、 $R_1$  と  $R_2$  および  $R_3$  と  $R_4$  がそれぞれ並列になるが、抵抗が並列ということはこれらに流れる電流が同相でかつ電流の配分が抵抗に逆比例するというのであるから、このことに着目し解釈を試みた。

実際の回路でオシロスコープを使用しても解釈は可能であるが、2現象オシロスコープは、2つのチャンネルのグランドが共通になっているため、表示された波形から任意の2箇所の電流の位相を理解するのは大変困難である。そこで任意の箇所の電流、電圧の波形を表示させることのできる回路シミュレータを用いることとした。使用した回路シミュレータは

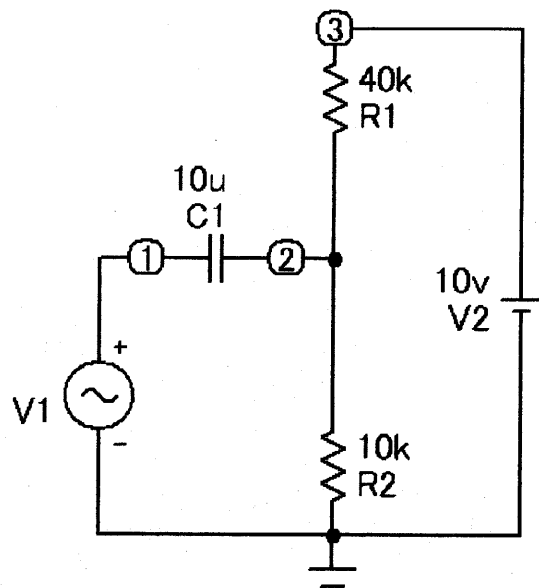


図4 入力側部分

Micro-Cap Evaluation 7.0 版である。これは正規版に比較して機能の制限はあるが、無料であり学生教育用には十分な機能を有している。

### 3-1 入力側

ここで図2の破線から左部分を入力側、右部分を出力側として考える。図3で入力側はR1, R2, hieの3つ抵抗が並列になっているが、2つの並列の場合が理解できれば3つの場合も容易に理解できるから、図2の入力側から hie を取り除いた図4のような回路で考える。ここで交流電源 V1 の電圧は 1[V] であり、周波数は 1[kHz] である。なお以下の電圧、電流の値はすべて最大値である。

図4で C1 に流れる電流を i(c1) とすると、波形は図5(a)のようになり、その値は 124.73[μA] となる。次に R1 に接続点2から3に向かって流れる電流を計測すると、図5(b)のような波形になり、その値は 24.95[μA] となる。また R2 に接続点2から GND に向かって

流れる電流を計測すると、図5(c)のような波形になり、その値は 99.78[μA] となる。これら3つの波形の位相を比べて見ると、全て同相であり、それらの値は並列抵抗の分流の法則に従っていることが分かる。これらことから交流的には抵抗 R1 と R2 は並列の働きをしていることが理解できる。

ちなみに、図4で接続点2から右側の回路をテブナンの定理を用いて回路を書き直すと図6のようになる。R3=8[kΩ] は、図4の R1=40[kΩ] と R2=10[kΩ] を並列にしたものである。この回路で C1 に流れる電流を i(c1) とすると、波形は図5(d)のようになり、その値は

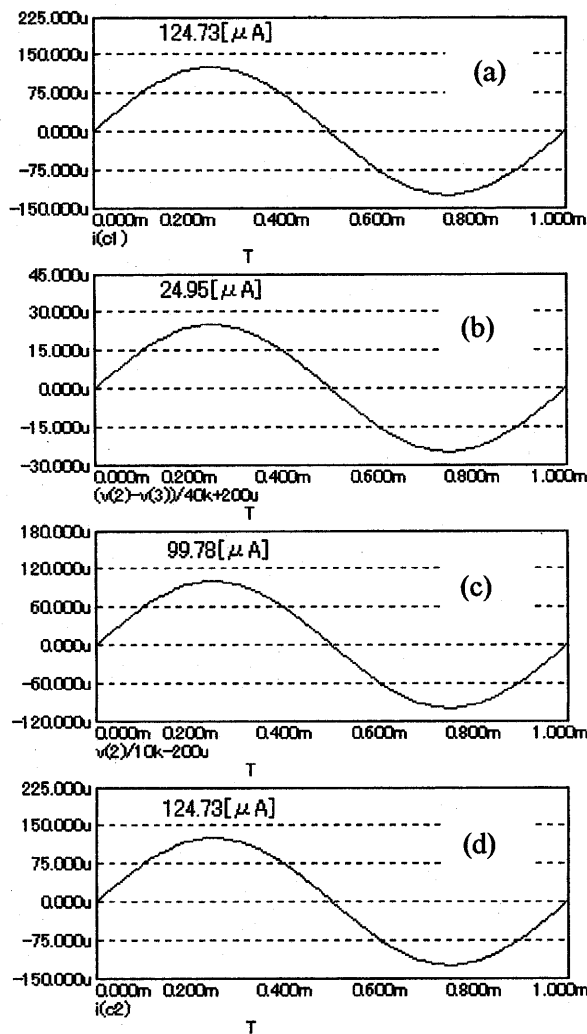


図5 電流波形とピーク値

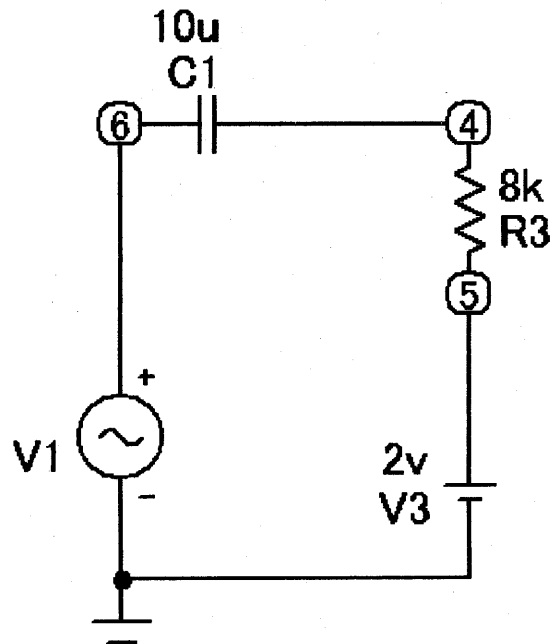


図6 図4の等価回路

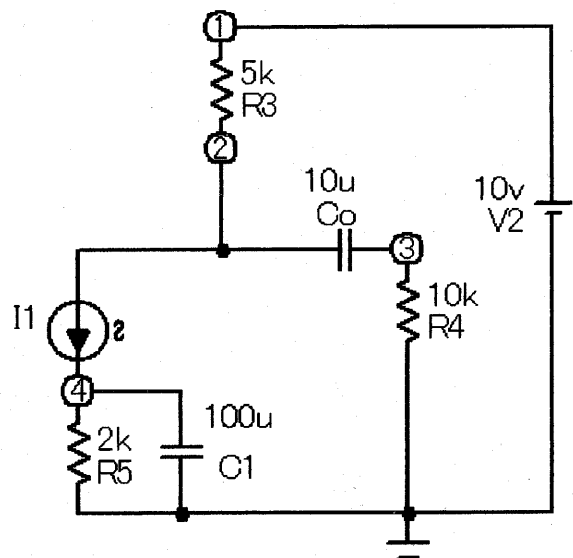


図7 出力側部分

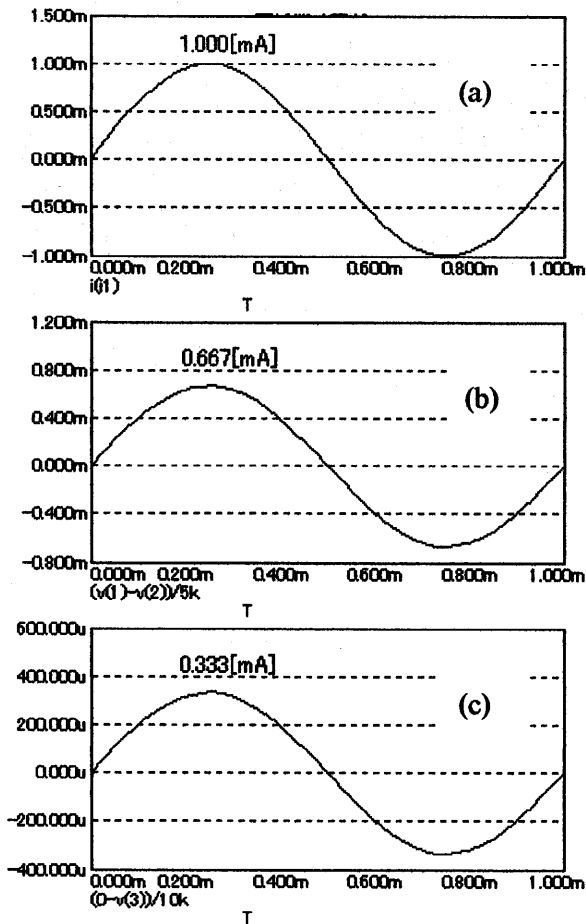


図8 電流波形とピーク値

124.73[ $\mu$ A]となり、当然のことながら図5(a)と同じ波形と値となる。

### 3-2 出力側

図2から出力側部分を取り出すと、図7のようになる。ここでI1は交流の電流源であり、波形は図8(a)のようになり、その値は1.000[mA]とした。次にR3に接続点2から1に向かって流れる電流を計測すると、図8(b)のような波形になり、その値は0.667[mA]となる。またR4に接続点3からGNDに向かって流れる電流を計測すると、図8(c)のような波形になり、その

値は0.333[mA]となる。これら3つの波形の位相を比べて見ると、全て同相であり、それらの値は並列抵抗の分流の法則に従っていることが分かる。

これらのことから交流的には抵抗R3とR4は並列の働きをしていることが理解できる。また0.667[mA]と0.333[mA]を加えると、電流源の電流値1.000[mA]になることからバイパスコンデンサのリアクタンスは無視できることもわかる。

## 4. おわりに

アナログ電子回路を習得する上での一つの山である交流等価回路の説明法について、内外の専門書に調査したところ、その記述は様々であることが分かった。

また筆者は、回路シミュレータを用いることで、電流の分配則の基本に立ち返って解釈する方法を提案することができた。

## 参考文献

- 1) 丹野頼元：電子回路，p.71，森北出版（1990）
- 2) 赤羽進，岩崎臣男，川戸順一，牧康之：電子回路（1），p.45，コロナ社（1990）
- 3) 佐野敏一，高木宣昭，竹内守：アナログ回路（I），p.22，オーム社（1991）
- 4) 押山保常，相川孝作，辻井重男，久保田一：電子回路，p.69，コロナ社（1991）
- 5) 雨宮好文，小柴展居，砂沢学：増幅回路の考え方，p.72，オーム社（1995）
- 6) 雨宮好文：電子回路学〔I〕，p.115，オーム社（1994）
- 7) H Martin Reekie：Analogue Circuit Design，p.50，Chatwell-Bratt（1995）
- 8) シリング，ビラブ 訳 山中惣之助，宇佐美興一：電子回路（II），p.246，マグロウヒル出版株式会社（1992）
- 9) 岡山努：アナログ電子回路設計入門，p.33，コロナ社（1998）