

A 級増幅回路の大信号時における歪特性

飯 島 眞 理

工 学

(1983年 7 月22日受理)

IJIMA, M., Distortion Analysis of Class A Amplifier in Large Signal Condition, in Japanese, Bull. Tokyo Gakugei Univ., Sect. 6, 35: 21—26 (1983) ISSN 0387-8953

In this study, the amplitude distortion in a transistor amplifier were investigated.

Class A transistor amplifier, in which collector current flows for 360° of a sinusoidal input wave form and the transistor is operated on the linear portion of its characteristic curve, are used mostly as audio amplifiers because of the wide frequency response and the low distortion in itself, however, the output signal appears to be flattened with an increasing sine-wave input amplitude, approaching a square wave.

The detailed distortion measurements with a spectrum analysis in such large-signal conditions of a class A transistor amplifier were carried out as a function of bias current, and furthermore, the wave distortion is simulated by computer from approximate direct current characteristics of the device.

These investigations allow an identification that the amplitude distortion is mainly made up of the second-harmonics of a fundamental sine wave.

The input-output characteristics around the bias point were effectively used for the purpose of explaining the distortion mechanisms.

KEY WORDS: class A amplifier, amplitude distortion, large-signal behavior, harmonic generation, spectrum analysis, computer simulation

1. ま え が き

中学校技術科電気領域で学習する増幅回路のうち最も基本的なものにトランジスタを用いた固定バイアス方式のA 級増幅回路がある¹⁾。この回路においてトランジスタは電流源として働き常に導通状態となるようバイアスされている。A 級動作は正弦波を増幅するときの効率が低く小電力増幅用に限られるが、広帯域信号(音声)の増幅が可能で一般に出力波形に現われる歪が小さいため広く用いられている^{2,3)}。しかし入力信号がある程度以上大きくなると、出力信号に顕著な非対称歪が観測される。

本研究はこのような大信号時における波形歪とその動作バイアス依存性について、周波数ス

ベクトルなどにより詳細に測定するとともに、歪が発生するしくみを新たに導入した特性グラフで説明し、さらに計算機によるシュミレーション解析が行なわれたものである。

2. A級増幅回路

供試トランジスタは教材用としてもよく使われている汎用タイプの2SC945で、そのエミッタ接地における V_c-I_c 特性を図1に示す。この素子でよく知られた固定バイアス方式のA級シングル増幅回路を製作し、電源電圧およびコレクタ抵抗をそれぞれ6Vおよび $1.1k\Omega$ で動作させた。入力信号は1kHzの正弦波で振幅は大振幅動作となるよう $10mV_{rms}$ とした。

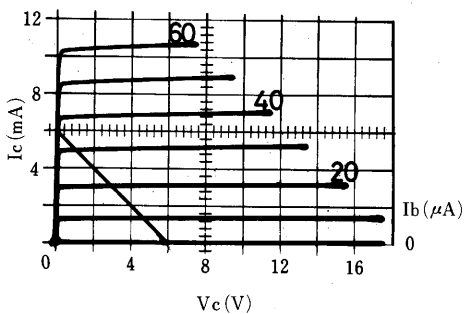
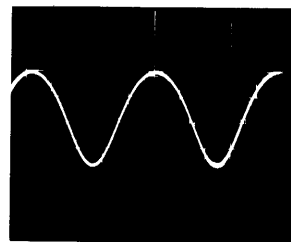


図1 供試トランジスタの V_c-I_c 特性

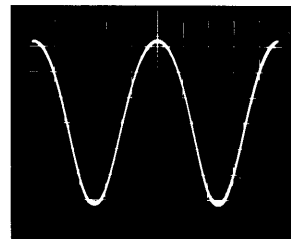
図2はこの増幅回路においてバイアス電流 I_b を10, 20および $30\mu A$ にしたときの出力波形である。 I_b が $20\mu A$ のとき最大出力振幅が得られ、それ以下あるいは以上でも出力振幅が小さくなることからわかる。この I_b が $20\mu A$ という値は V_c-I_c 特性における負荷直線の中点からも求められA級動作するときの最適バイアス点であると考えられる。バイアス点が最適な状態より外れると、出力波形に見られる歪が著しくなることがわかる。

【出力波形】

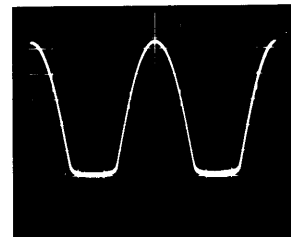


入力信号(正弦波 1kHz)
 $10mV$

バイアス電流
 $10\mu A$



$20\mu A$



$30\mu A$

図2 大信号時の出力波形

3. 歪波形の周波数分析

波形がひずむ要因を明らかにするため、歪波形に含まれる高調波成分を測定した。測定原理は、増幅回路の出力信号を、極狭帯域幅をもちその中心周波数が外部信号により掃引できるバンドパスフィルターを通したのち高感度交流電圧計で測定するもので、本研究においては自動位相追従型ロックインアンプと掃引発振器でこれを構成した。高周波成分の振幅値は、周波数マルチプライヤを併用し入力信号の整数倍の周波数で位相同期させた状態で測定した。また周波数スペクトルは再現性を高めるためにロックインアンプの時定数を $10msec$ とし、 $500Hz$ か

ら 5kHz を 100 秒間の充分遅い速度でリニヤ掃引させながら X Y レコーダで記録した。

オシロスコープで観測した出力波形 (図 2) の周波数スペクトルを図 3 に示す。入力信号 1kHz に対応する基本波成分の振幅は、バイアス電流 I_b が増すにつれ大きくなり、 I_b が $20\mu\text{A}$ のとき最大となる。そしてそれよりバイアスが深くなるとむしろ基本波成分は小さくなることが確認される。また波形に歪をもたらす高周波成分はバイアスの大きさによらずいずれも第 2 次の成分が測定されている。特にバイアス電流 I_b が $30\mu\text{A}$ 以上となることの第 2 次成分が顕著となってくる。このように波形の歪が、主として第 2 次高調波成分により生じていることがわかる。

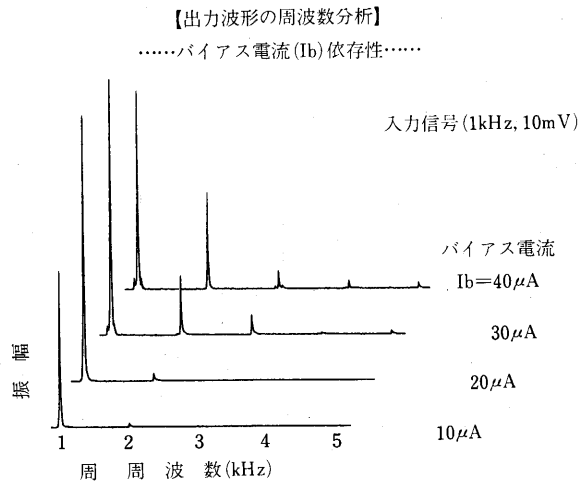


図 3 出力波形のスペクトル分析

4. 動作点を中心にした入出力特性による解析

2 次を含めた偶数次の高調波成分は波形に図 2 に見られるような上下非対称な歪を与える。供試増幅回路においてこの非対称歪が生じるしくみを直流入出力特性から求めたグラフを用いて解析する。

供試トランジスタについて測定したベース・エミッタ間電圧 V_b 対ベース電流 I_b 特性およびベース電流 I_b 対コレクタ電流 I_c 特性は基本的な特性としてよく知られたものであるが、歪発生のしくみをよりわかりやすく把握するため、この 2 つの特性グラフを合成し図 4 に示すようなベース・エミッタ間電圧 V_b 対コレクタ電流 I_c 特性を求めた。

この V_b-I_c 特性は増幅回路の入出力特性をより实际的に示すもので、 I_b が $10, 20, 30\mu\text{A}$ に対するそれぞれの動作バイアス点を図中に記されている。 I_b が $10\mu\text{A}$ のときダイオード順方向特性の指数関数的変化が強いところに動作点があり、 I_b が $30\mu\text{A}$ のときは電源電圧と負荷抵抗により決まる飽和領域近くに動作点があることがよく示されている。

出力波形における非対称歪が動作バイアス点により異なるようすを一層明らかにするため、図 4 における各動作点を中心にした入力電圧対出力電流特性をそれぞれ導いた。

図 5 は波形観測等により最も A 級増幅に適したと思われる I_b が $20\mu\text{A}$ のときの動作点を中心とした入力電圧 v_i

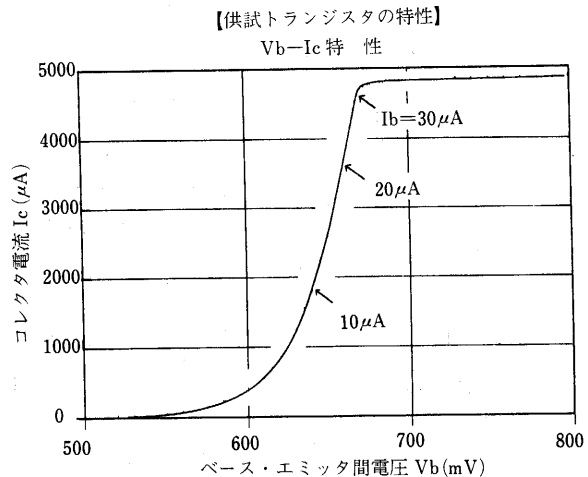


図 4 供試トランジスタの V_b-I_c 特性

V_b 対出力電流 $|i - I_c|$ 特性である。動作点におけるベース・エミッタ間電圧およびコレクタ電流をそれぞれ V_b および I_c とし、入力電圧 ($v - V_b$) が正のときを実線で負のときを破線で両対数グラフに示してある。

さて同図において入力電圧 $|v - V_b|$ が 10mV 近くになるまでは傾きが 1 ，すなわち入力と出力が正比例しており，また $|v - V_b|$ が正および負のときのグラフが重なっていることは増幅利得が正および負に振れる信号に対し等しいことを意味している。これらのことはこの動作点で 10mV の入力信号を加えたとき出力に歪が生じないことを示している。しかし入力信号が 10mV より大きくなるとまず $v > V_b$ のときに飽和領域に達するための強い歪が現われ，さらに大きくなると $v < V_b$ のときにもダイオード順方向特性によるゆるい歪が現われてくるのが容易に理解できる。

図6(1)および(2)にはバイアスが浅いとき ($I_b = 10\mu\text{A}$) および深いとき ($I_b = 30\mu\text{A}$) の動作点を中心とした直流入出力特性が示されているが，これらの図より非対称歪は特性が $v < V_b$ のときと $v > V_b$ のときとで一致しないとき生じるようすがよく示されている。

【増幅回路の入出力特性】

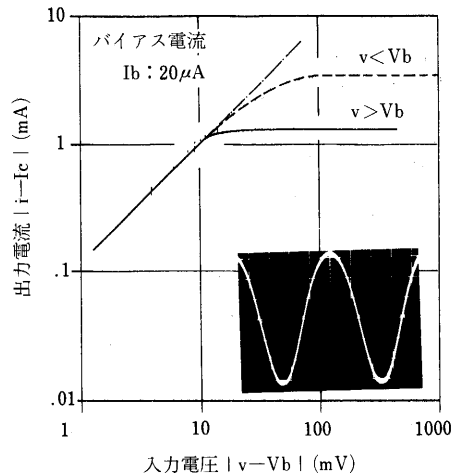


図5 最適バイアス点を中心にした入出力特性

5. 計算機による歪成分の解析

動作点を中心にした入出力特性から更に歪の高調波成分を求めるため計算機解析を行なった。すなわち図4の $V_b - I_c$ 特性を動作点を中心にした近似式で表わし，入力に基本波を与えたと

【増幅回路の入出力特性】

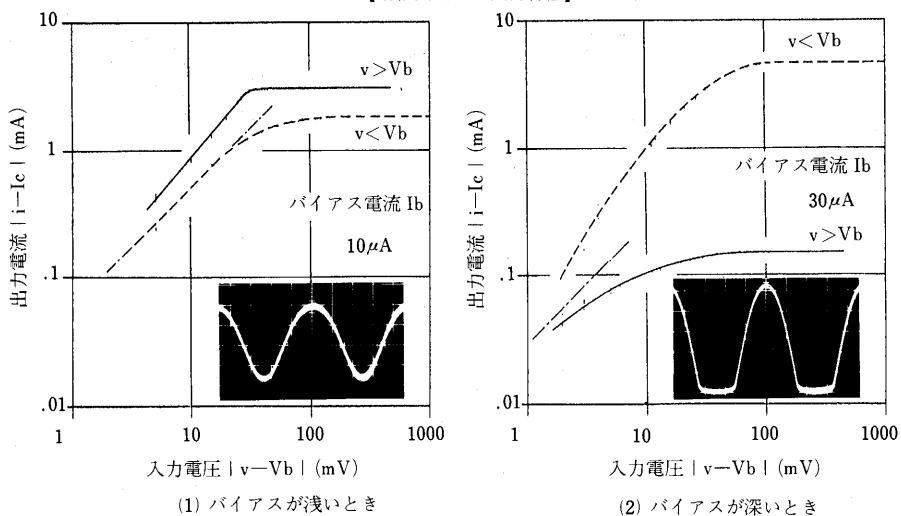


図6 バイアスが不適切なときの入出力特性

きの出力に生じる高調波成分を求めることにより波形歪の発生をシュミレートした。

いま図 4 に示される V_b-I_c 特性が、

$$y = i_c - I_{co}$$

$$x = v_b - V_{bo}$$

についてテーラ展開でき、近似的にべき級数

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + \dots$$

で表わされるとする。ここで入力信号 x が

$$x = m \cos(\omega t)$$

で与えられるとすると、出力信号 y は

$$\begin{aligned} y &= a + b m \cos(\omega t) + c m^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right] \\ &\quad + d m^3 \left[\frac{3}{4} \cos(\omega t) + \frac{1}{4} \cos(3\omega t) \right] \\ &\quad + e m^4 \left[\frac{3}{8} + \frac{4}{8} \cos(2\omega t) + \frac{1}{8} \cos(4\omega t) \right] \\ &\quad + \dots \\ &= a + \frac{1}{2} c m^2 + \frac{3}{8} e m^4 + \dots \quad (\text{直流成分}) \\ &\quad + \cos(\omega t) \cdot [b m + \frac{3}{4} d m^3 + \dots] \quad (\text{基本波成分}) \\ &\quad + \cos(2\omega t) \cdot [-c m^2 + \frac{4}{8} e m^4 + \dots] \quad (\text{第 2 次高調波成分}) \\ &\quad + \dots \end{aligned}$$

と表わされる。この式の偶数次数の非直線項からは非対称歪となる偶数次高調波が、奇数次数の非直線項からは対称歪となる奇数次高調波が発生する⁴⁾。

実際の計算は有効次数 16 桁で動作点を中心に 20 次までのべき級数展開を行なって V_b-I_c 特性を近似し、10 次までの高調波成分の振幅を求めた。動作点は実測値と比較できるようにバイアス電流 I_b が 10, 20, 30 μA の値を選んだ。

計算機シュミレーションにより求めた出力波形の歪成分を図 7 に示す。この図において入力信号周波数に対応する基本波成分はバイアス電流 I_b が 20 μA のとき最大となり、それ以下あるいはそれ以上でも減少している。そしていずれの動作点においても第 2 次高調波成分が大きく現われている。また基本波成分に対する高調波成分の比は I_b が最適値より大きくなるとより増大することが示されている。これらの計算機シュミレーションの結果は図 3 の実測値と良く一致していると考えられることから、この解析手法が歪が発生する要因を解明するのに有効であることが示された。

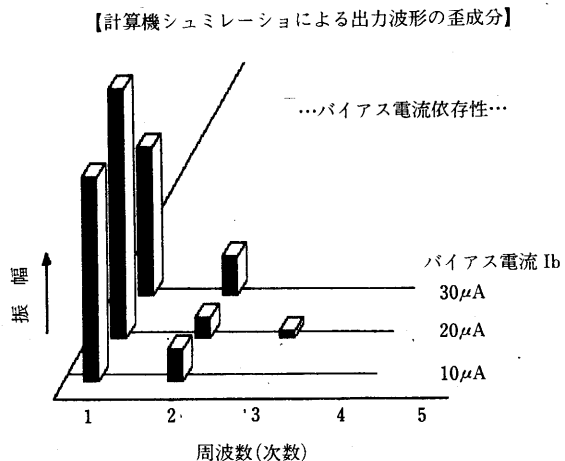


図 7 計算機シュミレーションによる出力波形の歪成分

6. あとがき

A級シングル増幅回路の出力波形歪を掃引方式による周波数分析により詳細に測定し、生じる歪は主として第2次高調波成分であることを明らかにした。そして動作点を中心にした入出力特性グラフを作成することで、歪が発生するようすを従来より理解しやすくなった。また動作点を中心にしたテラ展開により増幅回路の入出力特性をべき級数近似し、その結果をもとに計算機シュミレーションした出力波形歪が実測値とよく一致することを示した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の機会を与えていただいた本学技術科教育学科池本洋一教授および終始御指導いただいた本学技術科教育学科中橋政則助教授に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 中学校指導書 技術・家庭編, p. 56 (昭和53-5).
- (2) Frederick H. Raab: 高能率増幅回路の動作クラス分け, 日経エレクトロニクス (1976. 8. 23), pp. 121-146.
- (3) 岡部豊比古監修, トランジスタとICのための電子回路I (改訂第2版), マグロウヒル好学社, pp. 186-198 (昭和57-4).
- (4) 大越孝敬, 基礎電子回路, オーム社, pp. 25-27 (昭和45-10).