

# 卒業研究報告

題目

Micro-Cap5 / CQを用いた  
電子ボリュームの設計と製作

---

指導教員

綿森道夫助教授

---

報告者

新田 敏弘

---

平成13年2月9日

高知工科大学 電子・光システム工学科

## 目次

### 第 1 章

概要と目的.....	1
------------	---

### 第 2 章

#### Micro-Cap 5 / CQ の使い方について

2.1 Micro-Cap 5 / CQ の特徴 .....	2
2.2 トランジェント解析について.....	3
2.3 AC 解析について.....	5

### 第 3 章

回路要素の動作原理.....	8
----------------	---

### 第 4 章

電子ボリューム回路製作.....	21
------------------	----

### 第 5 章

結果.....	26
---------	----

### 第 6 章

総括.....	27
---------	----

謝辞.....	28
---------	----

参考文献.....	29
-----------	----

# 第1章 概要と目的

今までに、聞いたことのない回路を製作したいと思い、参考文献1(以下1))の中の電子ボリュームという回路に興味を持った。

これは、カレントミラー回路と差動増幅器を用いた回路で、制御電圧で電圧利得を変化させる回路である。

しかし、電子ボリューム回路の製作にあたる前に、基礎的な、トランジスタを用いた回路を学び、Micro-Cap5/CQで製作しなければならないと思い、いくつかの回路を実際に、トランジェント解析やAC解析により、入出力をシミュレートしてみた。

そして、カレントミラー回路と差動増幅器の動作原理を学び、自分でオリジナルの電子ボリューム回路を2種類シミュレートし、それを製作していくことにした。

また、電子ボリューム回路を作製するにあたり、基板パターンを、ホームページからダウンロードしたCADというソフトを用いて作製した。この時に、後に製作する感光基板のサイズに合わせるため、自分が作製した2種類の回路の基板パターンを縮小する事に心がけた。

その後、基板パターンをフィルムに印刷し、実際に感光基板を作製したものを、電子ボリューム回路の基板として使用し、素子を組み込んで、2種類の回路を作製した。

そして、実際に、電子ボリューム回路をMicro-Cap5/CQというソフトを用いてシミュレートし、本当に電圧利得は制御電圧でコントロールされているのか確認するとともに、いかに最適にするかを考えて設定した。

また、一方で、実際に回路を作製し、シミュレーションどうり動作するかを確かめて、Micro-Cap5/CQでシミュレートした結果を比較し、違った点を考察することで、これからの研究に役立つようにしていきたいと思う。

## 第2章 Micro-Cap5 / CQについて<sup>1)</sup>

### 2.1 Micro-Cap5 / CQの特徴

このソフトの特徴として以下のことが主に挙げられる。

1. アナログ回路（今回作製した電子ボリューム回路）、デジタル回路設計
2. アナログ回路、デジタル回路の動作チェック（トランジェント解析（時間変化による電圧、電流の変化）、伝達関数（ヘビサイドの演算子法を用いて、コンデンサや、コイルを含む回路の電圧波形や電流波形を計算し、回路の利得をラプラス関数の演算子  $s$  の関数で表現したもの）・周波数特性の解析（周波数変化による利得や歪み率、位相を計測）、DC解析（コンデンサをオープン、コイルをショートとして扱い、抵抗間やトランジスタ間の電圧と電流の変化を計測）
3. 回路定数の変化による回路への影響（ステップングという操作を行い抵抗等の値を変化させた場合の回路特性を同時に表示）
4. 温度変化による回路特性変化の解析（解析ボックス画面で、温度の英訳 `Temperature` の数値を変化させることによる解析）
5. 回路定数の最適化（歪まない回路を設計するにあたり、回路定数をどのような値にするか検討する）

以上の特徴を学び、回路を設計し、シュミュレートしていく事の準備とした。

## 2.2 トランジェント解析について

電子回路において、時間と共に変化していく電圧、電流の波形を表示するには、トランジェント解析を行わなければならない。例えば、下図2-1の回路があったとする。この回路をトランジェント解析するには、まず、目的とした回路をMicro-Cap5/CQの回路図領域に表示させた状態で、[Analysis]をクリックし、次に、[Transient]とクリックしていく。そうすると、画面上に、トランジェント解析範囲設定ボックス(Analysis Limits dialog box)が表示される。ここで、まず、数値範囲から設定していく。

時間範囲(Time Range)はシミュレーションの時間範囲を指定する。実際に下図の場合には、5mと入力した。これは0秒から5mm秒までの時間範囲を指定している。よって、5mだけを入力した場合は0と認識される。もし、1μ秒から5μ秒に指定するには、“5u、1u”と入力する。

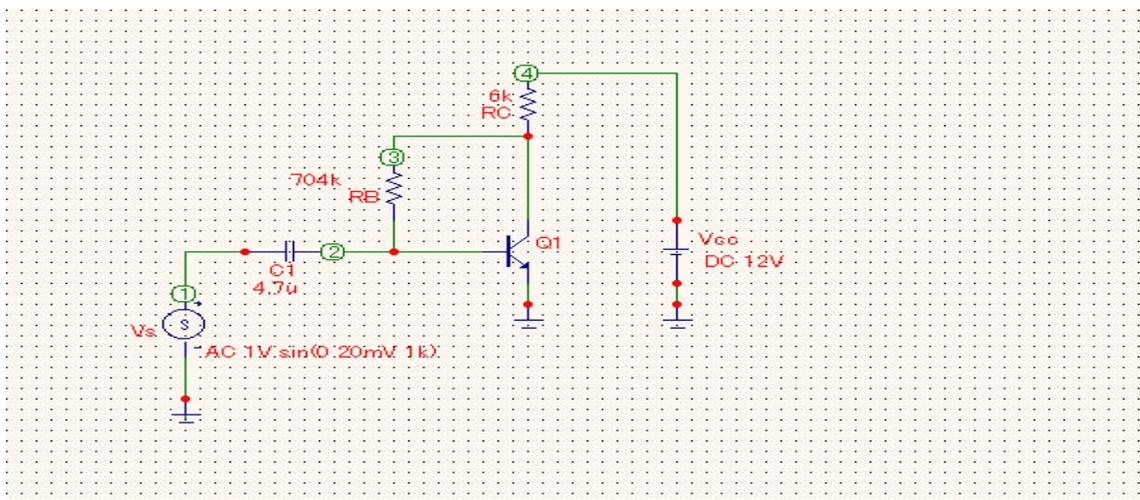


図2.1 一石増幅器

温度 (Temperature) は、解析における温度を設定する。ここで入力する温度は摂氏で、27と入力すると、27 となる。また、“High、Low、Step”と入力できるようになっており、“50、27、1”と入力すると、27 から50 まで1 間隔で表示される。

次に波形オプションを設定する。波形オプションは、横軸 (X) と縦軸 (Y) の範囲と変数を指定できる。

X expressionは、X軸の変数を指定するもので、ここでは単にT (時間) を入力する。

Y expressionここでは、ノード番号1、2、3の電圧と抵抗RBに流れる電流の様子が見たいので、それぞれ入力する。ここでは、抵抗RBに流れる電流は、I (RB) と入力する。

X rangeはX軸の範囲を入力する。例えば、1 μ秒から5 μ秒を見たいときには“5 u、1 u”と入力する。ここでは、0、0.05と入力した。これは0秒から5mm秒までの範囲で波形が表示される。

Y rangeはY軸の範囲を入力する。ここではX rangeにも使用される、autoという機能を用いた。これはautoと入力すると自動的に範囲を設定してくれる機能である。

Fmtは数値表現を設定するもので、ここでは5.3と入力した。これは、整数は5桁表示で、少数部分は3桁であることを表している。

いままで、設定した結果、下図の2.2の波形を表示することができる。

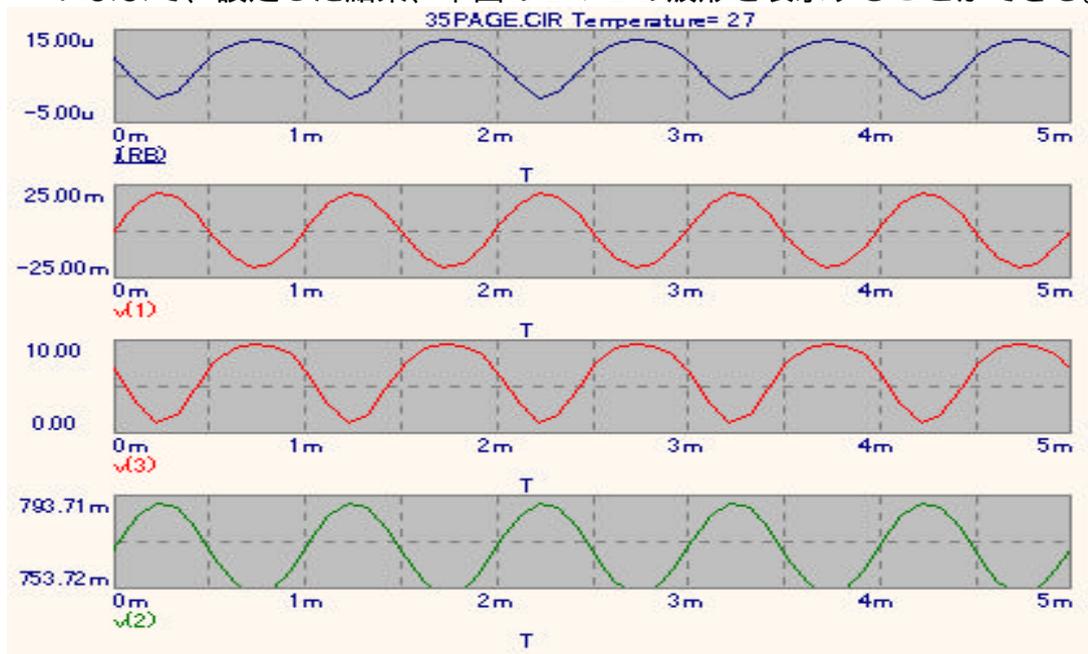


図 2.2 図 2.1 の増幅回路のトランジェント解析結果

## 2.3 AC解析

今度は、下図2.3の電圧利得を求めるとする。

まず、トランジェント解析と同様に、[Analysis menu]の中から[AC Analysis]をクリックする。この時回路に誤りがなければ、AC解析範囲設定ボックスが、表示される。ここに数値を入力する。

周波数範囲(Frequency)は、解析する周波数の範囲を指定する。ここで、周波数範囲を1Hzから1MHzまでとして設定した。

温度(Temperature)は、トランジェント解析の場合と同じく、27に設定した。

雑音入力(Noise Input)は入力雑音を計算するために信号源を指定するためのもので、ここでは入力していない。

雑音出力(Noise Output)は出力雑音を計算するためのノードを入力する。ノード番号1、2と順に入力していくが、ここでは入力していない。

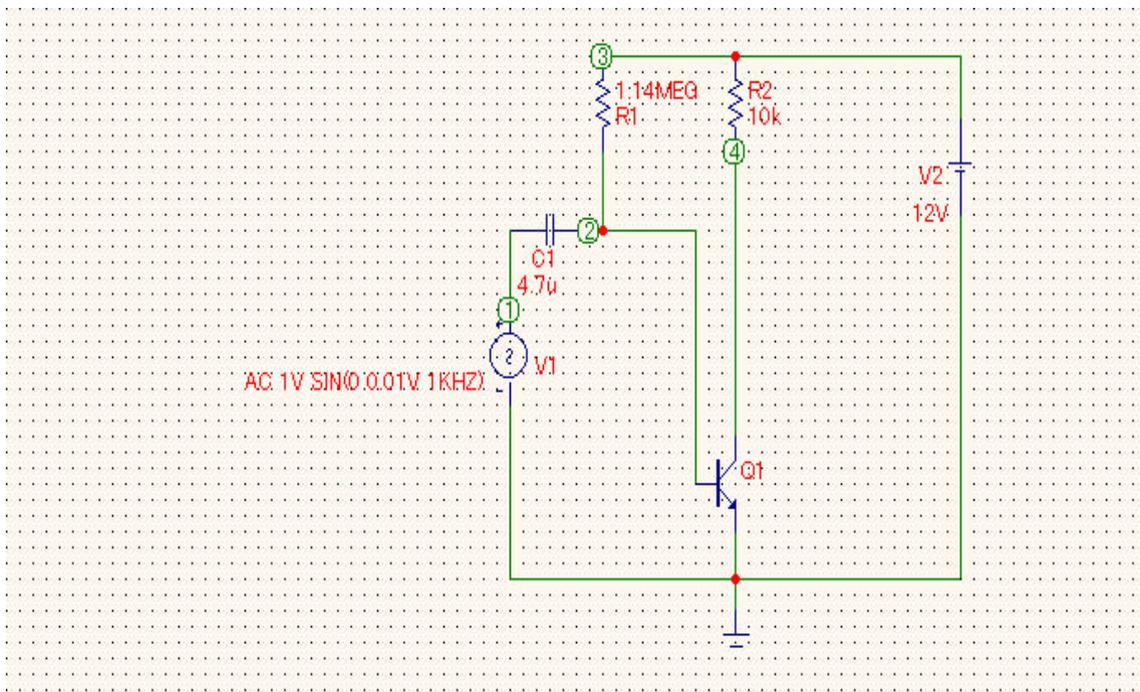


図2.3 一石増幅回路2

次に波形オプションを設定する。

X e x p r e s s i o n は X 軸の変数を設定する。ここでは、変数 F (周波数) を入力している。

Y e x p r e s s i o n は Y 軸の変数を設定する。利得を選択する場合には “ d b ( v ( 4 ) ) ” と入力すれば、ノード番号 4 の電圧を観測する事ができる。他にも M A G ( 振幅 ) や P H ( 位相 ) 等を入力すれば、それぞれの場合の解析が行なえる。

X r a n g e は X 軸の範囲を設定する。ここでは 1 から 1 0 M H z と入力する。

Y r a n g e は Y 軸の範囲を設定する。ここでは、トランジェント解析と同様に A U T O と入力する。

F m t は整数 5 桁、少数 3 桁に設定したいので、 5 . 3 と入力する。

また、トランジスタの電流増幅率を変化させたいときにはステッピングという動作を行なう。これは、A C 解析範囲設定ボックスの S t e p p i n g をクリックして、ステップ ( 値が変化していく場合を表示 ) させていく。

S t e p W h a t ではステップさせる素子を選択する。電源電圧の値や抵抗、コンデンサやコイル等が選択できる。ここで、図 2 . 3 の回路のトランジスタをステッピングさせることにする。

そして、各種パラメータの選択をする。I s ( 飽和電流 )、R C ( コレクタ抵抗 )、R E ( エミッタ抵抗 ) 等がある。ここでは素子をトランジスタにしているので、B F ( 電流増幅率 ) を選択する。

そして、ステップさせる範囲を設定する。

F r o m はステップさせるパラメータの初期値を設定する。補足であるが、ログステップさせた場合は 0 以上に設定しなければならない。ここでは 5 0 と入力する。

T o はステップさせるパラメータの最終値を設定する。これもログステップは 0 以上である。ここでは 2 0 0 と入力する。

S t e p V a l u e は F r o m から T o までの値を表示させる場合に、値を刻む設定である。ここでは 5 0 と入力する。

最後にステ - タス ( S t a t u s ) を O n にして、表示をさせることにする。

図 2 . 3 の回路の電圧利得と位相を表示すると図 2 . 4 になる。  
 また、図 2 . 4 をステップングすると図 2 . 5 になる。

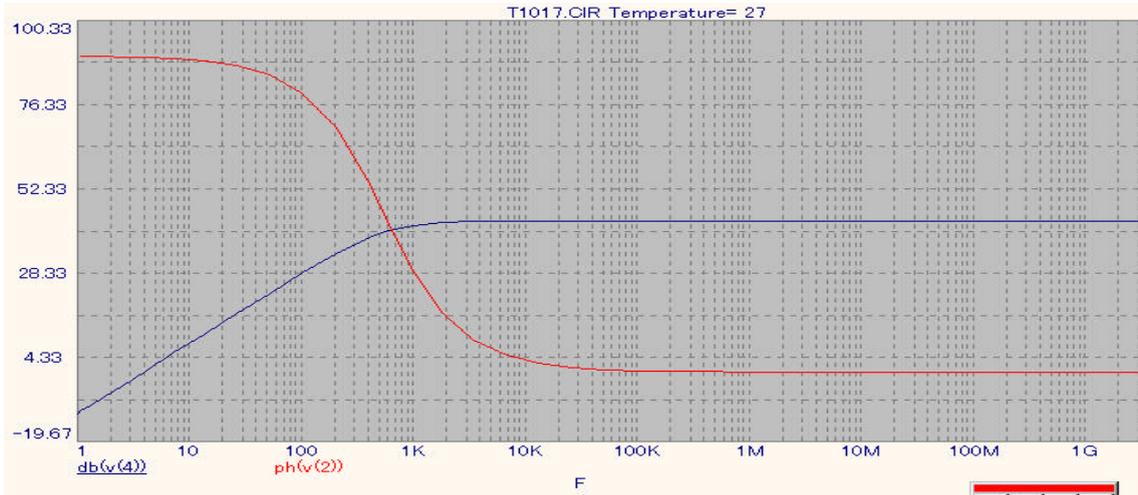


図 2 . 4 図 2 . 3 の一石増幅回路の A C 解析結果

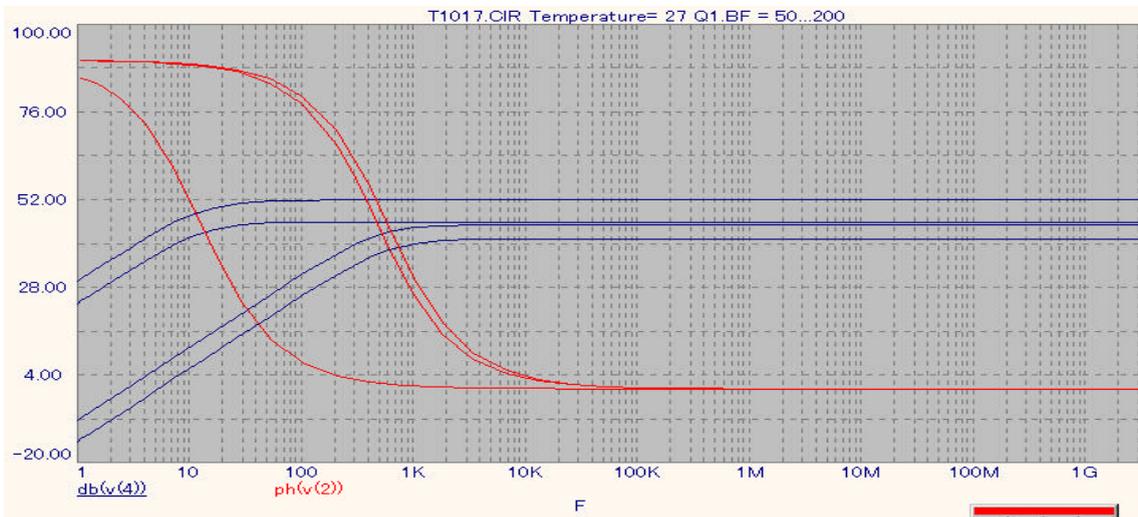


図 2 . 5 のステップング A C 解析結果

## 第3章 回路要素の動作原理<sup>2) 3) 4) 5) 6)</sup>

まず最初に、後で、図3.7の電子ボリューム回路として設計する回路を、Micro-Cap5/CQで製作して、それをシュミュレートすることにした。しかし、回路を製作するにあたり、トランジスタ回路の原理を学ばなければならないと思い、まず、差動増幅器について理解することにした。

差動増幅器は2個のトランジスタを対象に向き合わせて動作させるものである。

また、差動増幅回路そのものは、コンデンサや、コイル、トランスを用いなくても動作できるので、小型化できるという利点がある。

そして、差動増幅器の働きを学ぶために、実際に、図3.1の差動増幅器1を設計した。

入力信号は振幅と周波数をそれぞれ0.05Vと1kHzにし、抵抗を全て7.5kに設定した。トランジスタは2SC1815を用いた。このトランジスタは電流増幅率が100倍で、特徴として、高耐圧で、電流容量が高い。今回、作製した電子ボリューム回路では、このトランジスタを使用した。詳細なデータは次に示した。

```
.MODEL 2SC1815 NPN (IS=0.1F BF=100 NF=1  
VAF=0 IKF=0 ISE=0 NE=1.5 BR=1 NR=1  
+ VAR=0 IKR=0 ISC=0 NC=2 RE=0 RB=0 RBM=0  
IRB=0 RC=0 CJE=0 VJE=750M MJE=330M  
+ CJC=0 VJC=750M MJC=330M XCJC=1 CJS=0  
VJS=750M MJS=0 FC=500M TF=0 XTF=0 VTF=0  
+ ITF=0 PTF=0 TR=0 EG=1.11 XTB=0 XTI=3  
TRE1=0 TRE2=0 TRB1=0 TRB2=0 TRM1=0
```

図3.1の作動増幅回路1はQ1とQ2に何も入力しない場合の回路である。この場合、R1とR2には、等しい電流が流れるので、当然、ノード番号1、2、3の電圧は等しいであろうと結果を予想した。そして、図3.1のノード番号1、3、4の電圧をトランジェント解析でシュミュレートした。この時、トランジェント解析設定ボックスには、時間範囲を0sから10msに、温度を27と入力した。X軸とY軸の範囲は、autoと入力した。

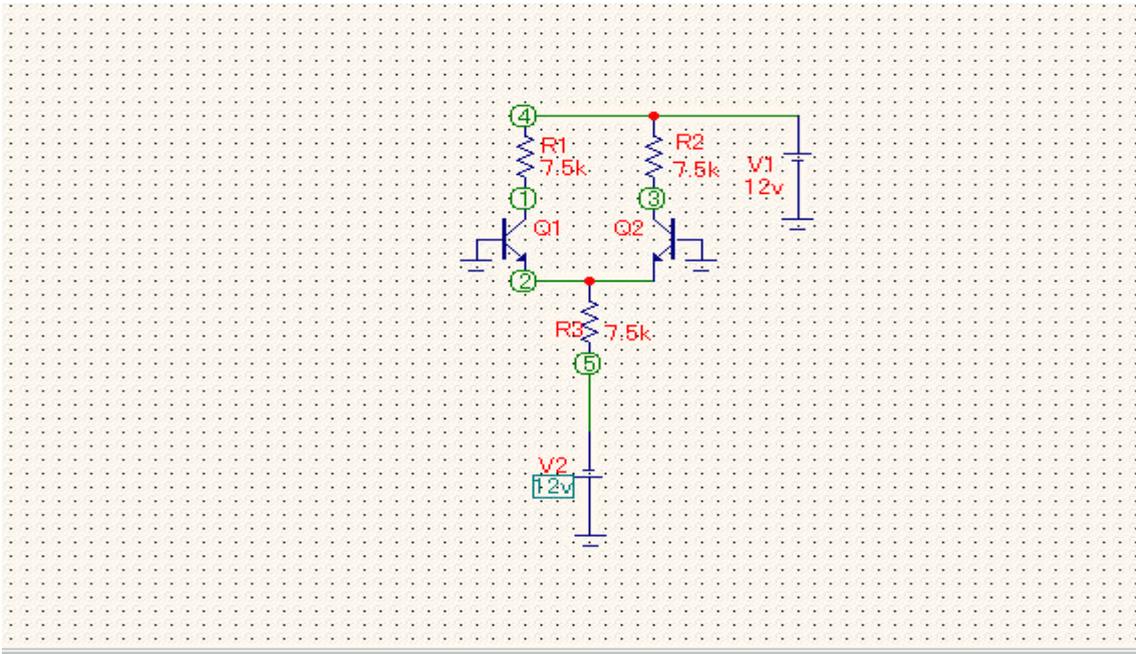


図 3 - 1 差動増幅回路 1

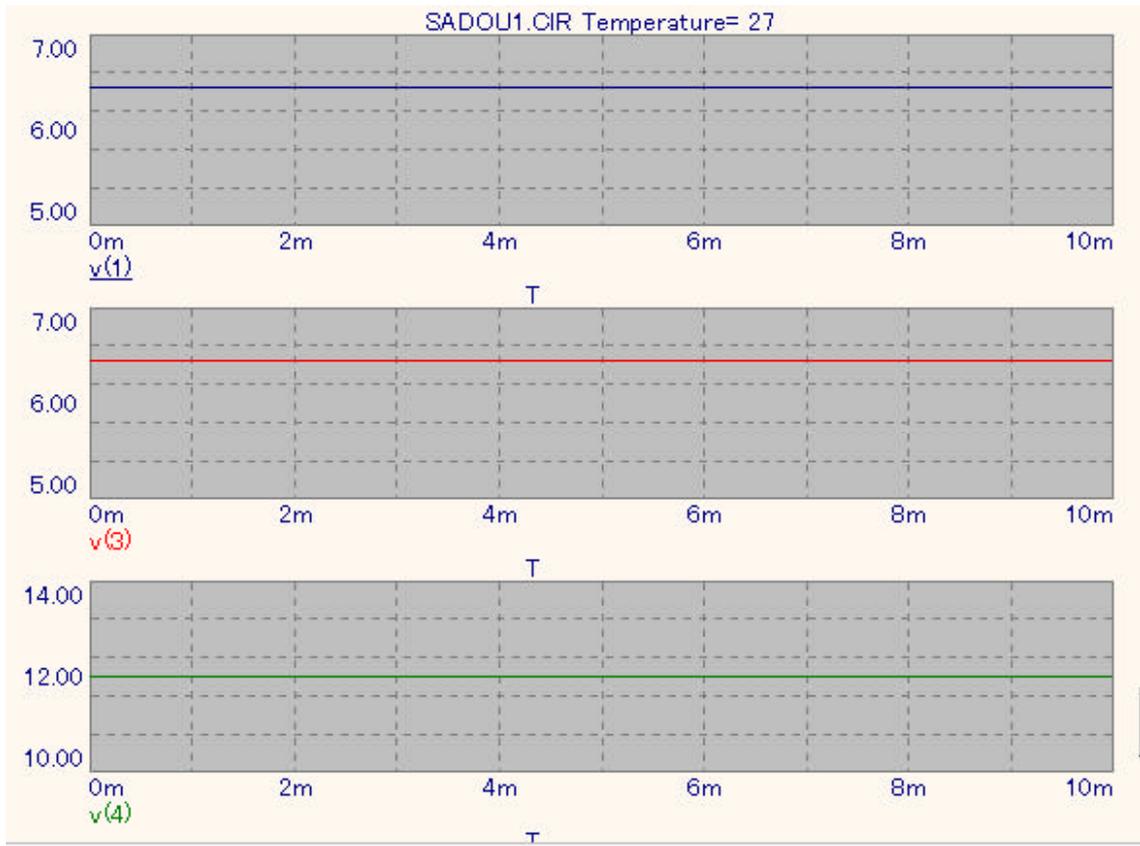


図 3 . 2 図 3 . 1 の差動増幅回路 1 のトランジェント解析結果

図より、ノード番号 1、3 の電圧は、まったく等しいことがわかった。

次に、この回路を変えてみることにした。

図 3 . 3 で示された差動増幅回路 2 の特徴として、まず、片方のトランジスタのコレクタ電流を直流から交流まで増幅することができる。従って、もう片方のトランジスタのコレクタ電流は直流、交流が、減少していくのである。図 3 . 1 の場合は、入力信号 V 3 が、トランジスタ Q 1 のベースに入っているが、Q 2 のベースは、アースに接地することにした。そして、出力をノード番号 4 で見ることにした。

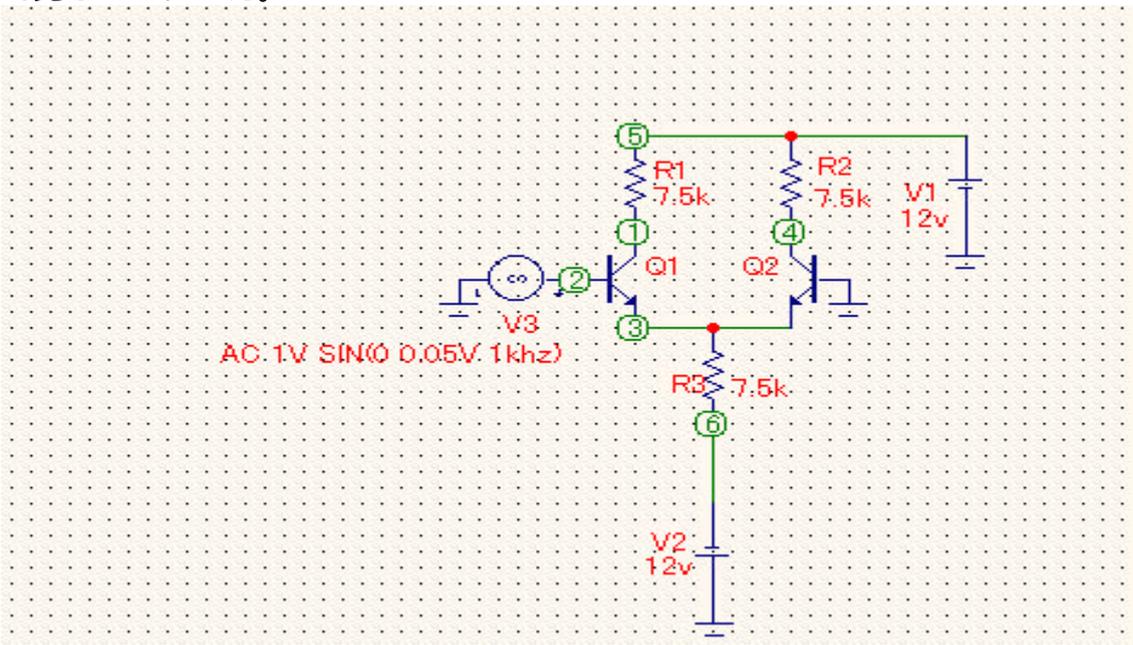


図 3 . 3 差動増幅回路 2

ここで、入力信号を Q 1 のベースに加えると、Q 1 に流れる電流が増加する。そうすると、Q 2 のコレクタに流れる電流は減少し、抵抗 R 2 の両端の電位差が増加して、ノード番号 4 の電圧が上がる。逆に R 1 の両端の電位差は増加し、ノード番号 1 の電圧は下がる。これは、一定の電流が、Q 1 と Q 2 に流れるという差動増幅器の原理から成立っている。

次に実際にトランジェント解析における、ノード番号 1、2、4 の電圧変化を実際にシミュレートしてみた。まず、トランジェント解析設定ボックスから、Time Range を 0 s から 1 ms に入力した。次にノード番号 1、4 から、電圧を 15 V まで観測できるように入力した。そして、図 3 . 4 の波形が、シミュレーション結果から得られた。この結果から、ノード番号 1、4 の波形から、位相が逆であることがわかる。

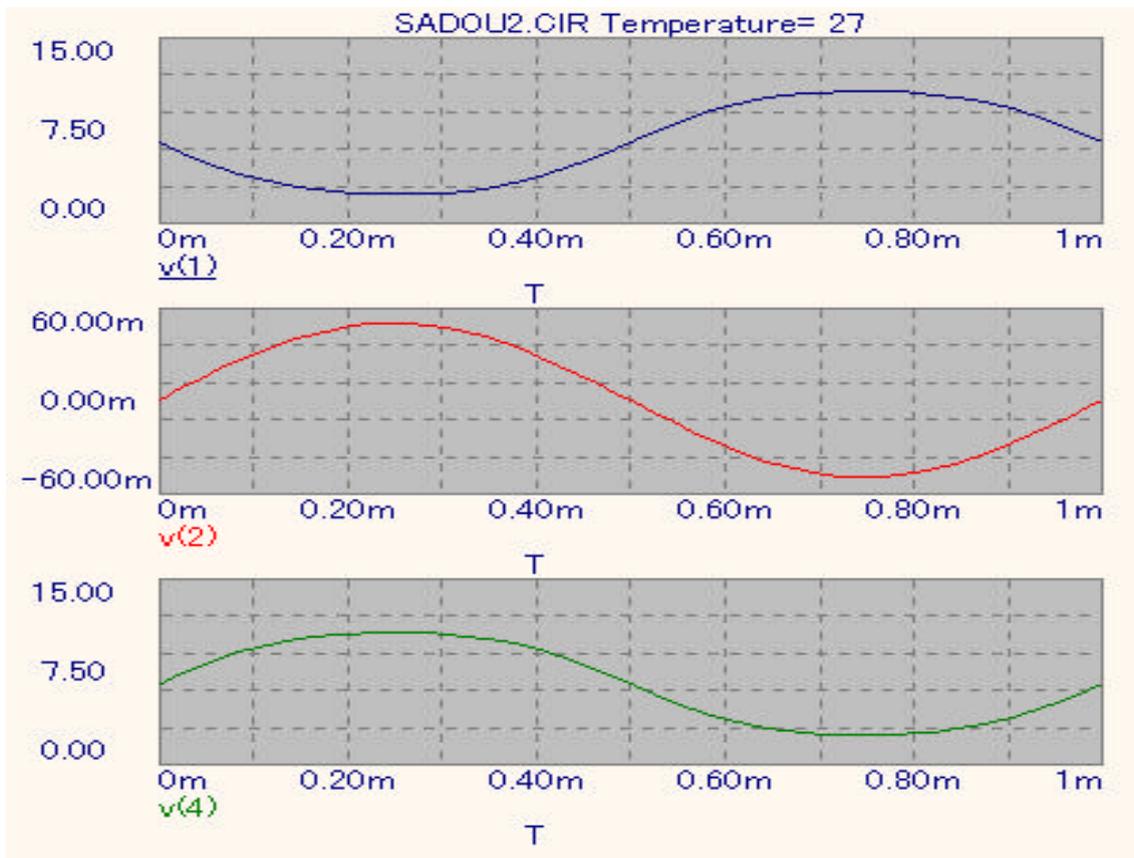


図 3 . 4 図 3 . 3 の差動増幅回路 2 のトランジェント解析結果

次に、図 3 . 3 の差動増幅回路回路 2 の Q 2 に、Q 1 の回路を正と負を逆にした入力信号を加え、図 3 . 5 の差動増幅器 3 を設計した。ノード番号 1、4 の電圧波形は、逆相であると予想した。その原理は、ノード番号 1 番は、抵抗 R 1 に流れる電流が増加すれば、ノード番号 6、1 の電位差が上がるので、波形が逆相になることである。また、この原理と同じで、ノード番号 4、5 番も全く逆の位相になる。そして、トランジェント解析で、電圧をシミュレートする際、トランジェント解析設定ボックスには、時間範囲を 0 s から 20 ms に、それ以外は差動増幅器 1、2 はと同じ入力をした。そして、実際に、ノード番号 1、2、4、5 の電圧のトランジェント解析をシミュレートした。

その結果、図 3 . 6 の結果を得られた。

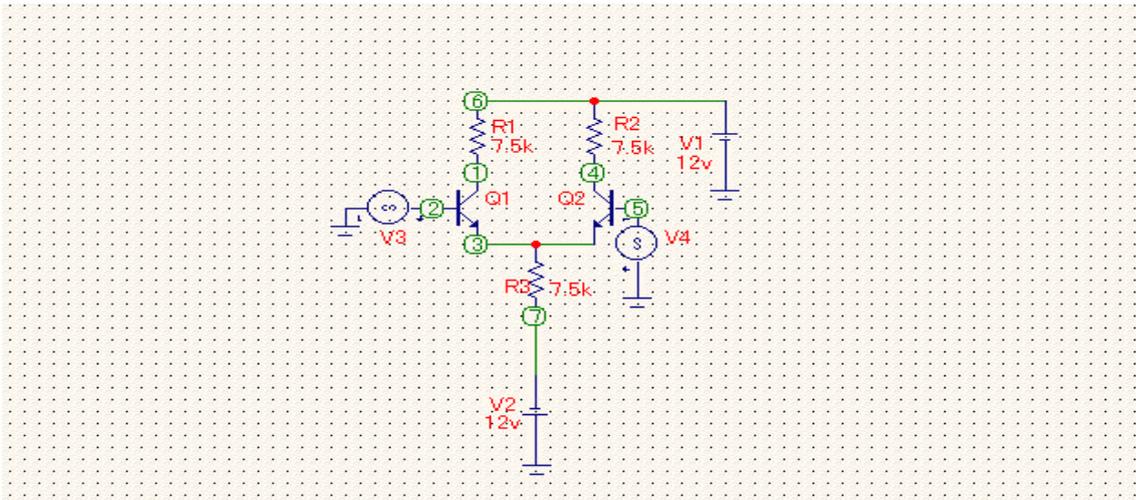


図 3 . 5 差動増幅回路 3

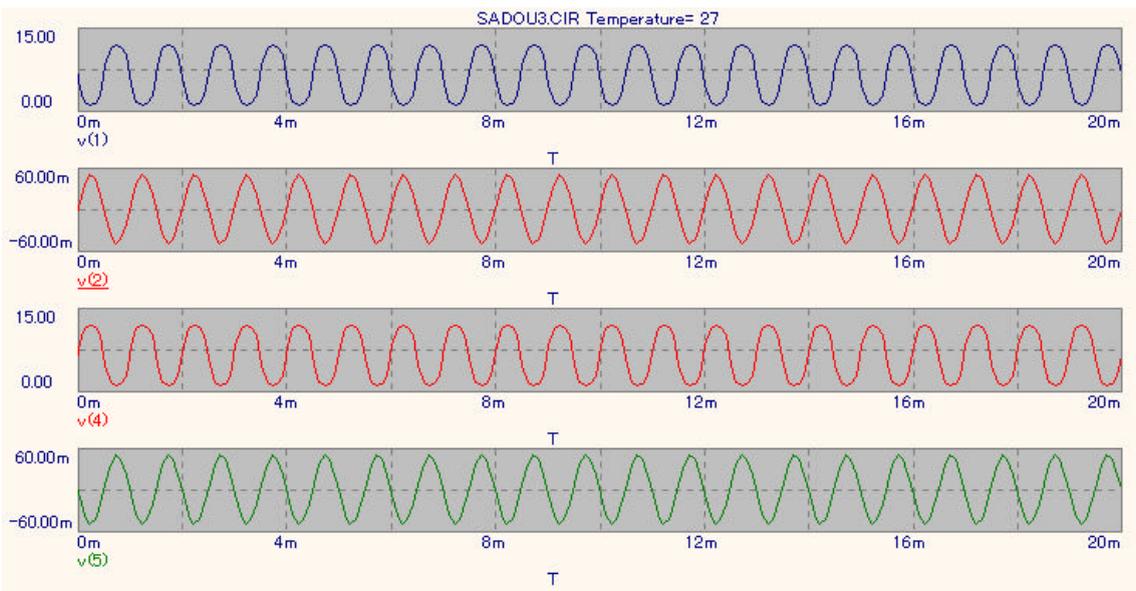


図 3 . 6 図 3 . 5 の差動増幅回路 3 のトランジェント解析結果

図 3 . 6 のノード番号 1、2 とノード番号 4、5 はそれぞれ逆相になり、予想と一致した。

次に、図 3 . 7 電子ボリューム回路 1 を設計した。入力をノード番号 1 に、出

力をノード番号4にした。入力電圧 $v_1$ は、2、355vの振幅に設定した。この回路はトランジスタ $Q_1$ と $Q_2$ のペアと $Q_3$ と $Q_4$ のペアが、差動増幅器として動作している。 $Q_1$ と $Q_2$ のエミッタから入力信号 $V_1$ の交流の電流が流れるようになっている。また、 $Q_3$ と $Q_4$ のエミッタから、負電源 $V_2$ のからの直流電流が流れるようになっている。ここで、 $Q_1$ 、 $Q_2$ の役割としては、もし、 $Q_1$ と $Q_2$ だけのトランジスタを使用すると、 $Q_1$ には制御電圧から信号が送られ、それにより、 $Q_1$ のコレクタ電流が増加する。逆に $Q_2$ のコレクタ電流が減少して、正電源からのバイアス電流や電流の振幅が、減少してしまう。そこで、 $Q_3$ と $Q_4$ を差動増幅器として機能させてやる。 $Q_3$ と $Q_4$ には、バイアス電流を $Q_1$ と $Q_2$ に加えるという働きをさせる。ここで問題なのは、 $Q_2$ のコレクタ電流の振幅とともに、バイアスも減少することであるから、図3.1の電子ボリューム回路のように、負電源からバイアスをもってくる方法を取る。そうすると、失われた $Q_2$ のバイアスが、 $Q_4$ より加えられることにより、 $Q_1$ と $Q_2$ のエミッタから流れる交流電流に加えられたバイアスと一致する。これが電子ボリュームの原理の一つである。

また、 $Q_1$ と $Q_4$ 、 $Q_2$ と $Q_3$ はカレントミラー回路になっている。これは互いに逆を向いたトランジスタのコレクタからは、同じ定電流が流れる働きのある回路である。

そして、実際の回路の各値は図3.8になり、トランジェント解析を行なった。

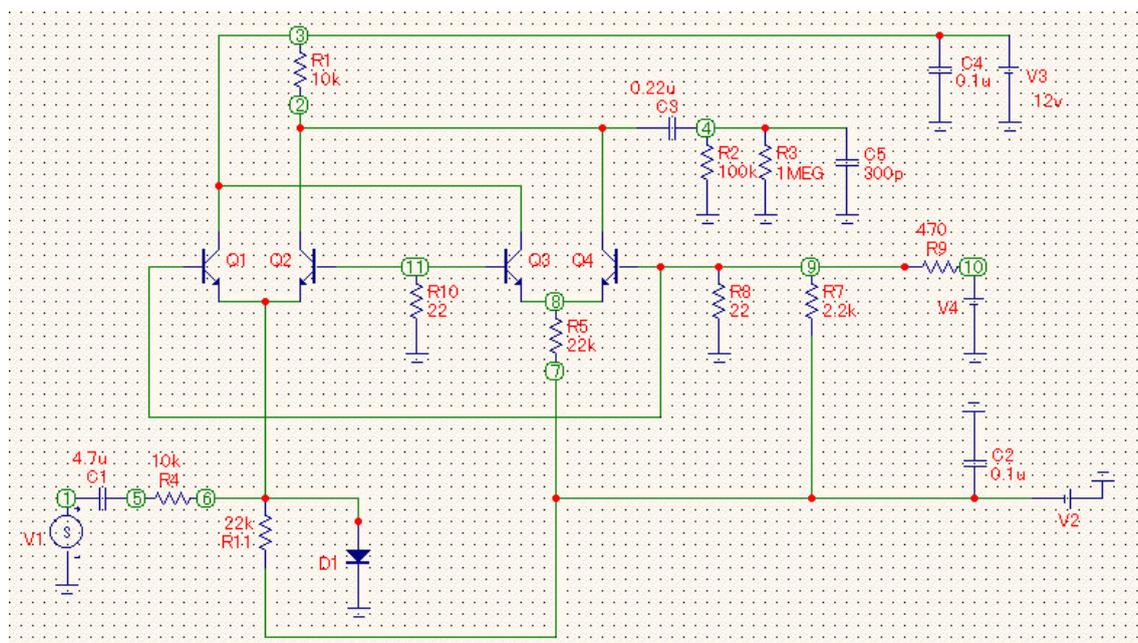


図3.7 電子ボリューム回路

Micro-Cap V  
 Transient Analysis of DENSHI.CIR

Temperature= 27 Case= 1

DC Operating Point Values

DC Operating Point Voltages

Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Vol
1	0	2	6.94	3	12	4	0
5	-0.756	6	-0.756	7	-12	8	-0.
9	-0.114	10	0	11	-0.00022		

Diodes

	D1
ID	-7.67e-013
VD	-7.56e-001
REQ	9.87e+011
CAP	0.00e+000

Bipolar Junction Transistors

	Q1	Q2	Q3	Q4
IB	6.25e-008	5.00e-006	5.00e-006	6.25e-008
IC	6.25e-006	5.00e-004	5.00e-004	6.25e-006
VBE	6.43e-001	7.56e-001	7.56e-001	6.43e-001
VBC	-1.21e+001	-6.94e+000	-1.20e+001	-7.05e+000
VCE	1.28e+001	7.70e+000	1.28e+001	7.70e+000
BETADC	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002
GM	2.42e-004	1.93e-002	1.93e-002	2.42e-004
RPI	4.14e+005	5.18e+003	5.17e+003	4.14e+005
RX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
RO	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012
CPI	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CMU	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CBX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CJS	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
BETAAC	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002
FT	3.84e+015	3.08e+017	3.08e+017	3.85e+015

図 3 . 8 図 3 . 7 の電子ボリューム回路の各値

ノード番号 1、4 の入出力電圧のトランジェント解析を行なう際、トランジェント解析設定ボックスの時間範囲を、0 s から 10 m s、温度を 27 と入力した。X 軸と Y 軸のスケールを a u t o にした。そして、図 3 . 9 の結果が得られた。

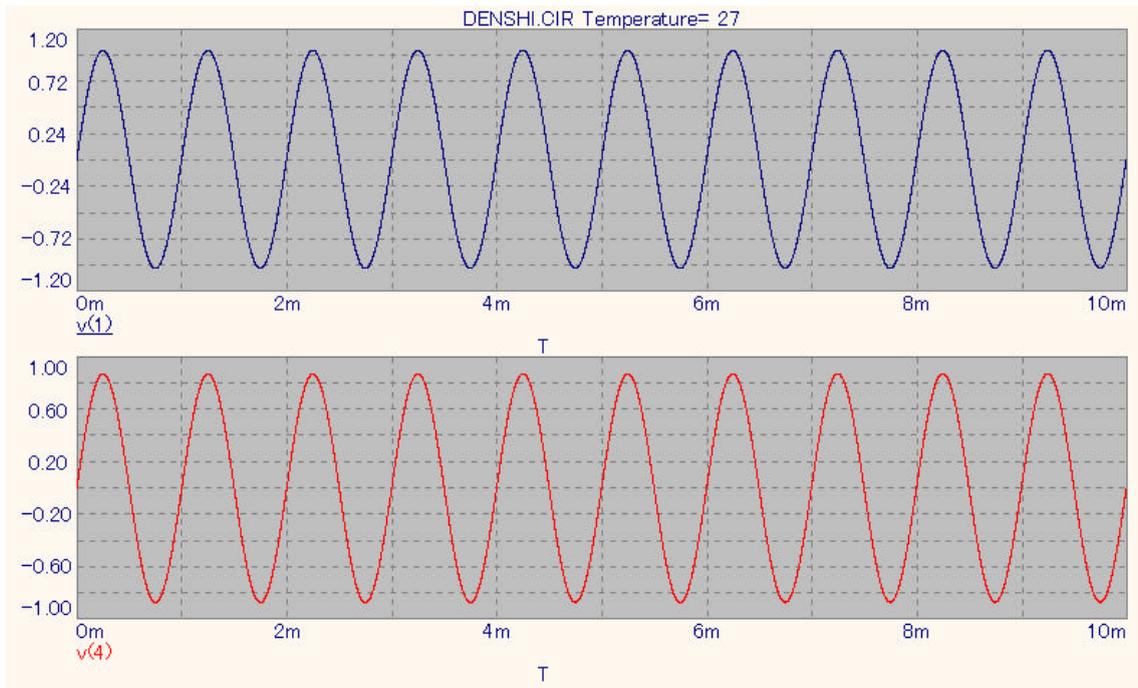


図 3 . 9 図 3 . 7 の電子ボリューム回路 1 のトランジェント解析結果

図 3 . 9 から、図 3 . 7 で示される、電子ボリューム回路 1 の入力電圧波形と出力電圧波形は同相であることがわかった。

次に、図 3 . 7 の電子ボリューム回路 1 の出力の電圧利得をシミュレートした。その際、A C 解析設定ボックスに、周波数範囲を 1 0 H z から 1 M H z、温度を 27 と入力した。X 軸と Y 軸を a u t o にした。そして、制御電圧を 1 v から 5 v までステップングを行い、その変化に注目した。シミュレートした結果、制御電圧が上がることによって、R 1 に流れる電流が増加するので、ノード番号 4 の電圧が下がり、電圧利得が減少していくと予想した。

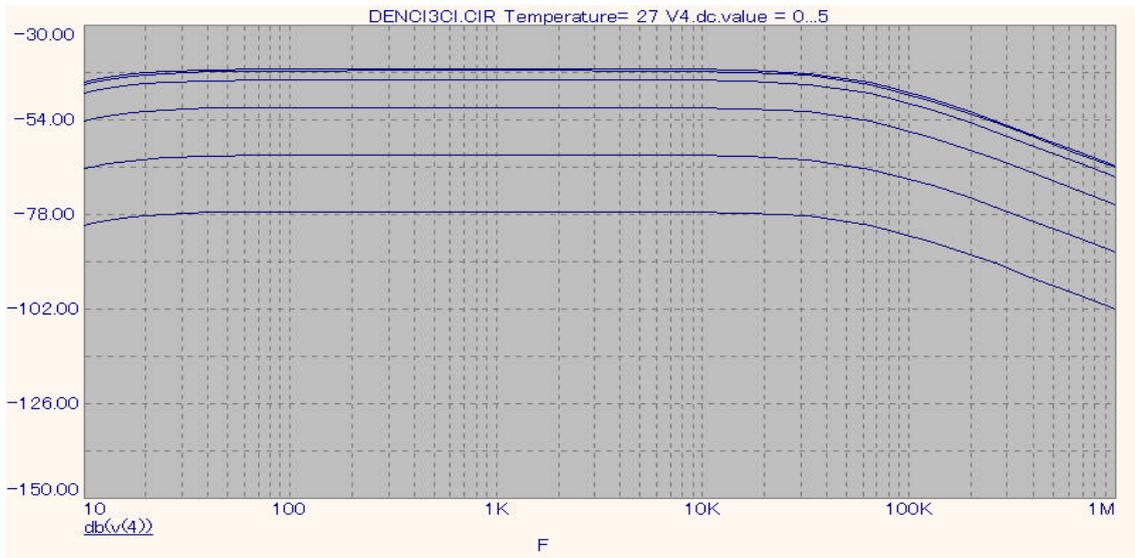


図 3 . 1 0 図 3 . 7 の電子ボリューム回路 1 の A C 解析結果

図 3 . 1 0 の結果から制御電圧を上げることにより、出力電圧の利得が下がっていくことがわかる。

次に、図 3 . 7 電子ボリューム回路 1 を変えて、歪み率を低くするため、エミッタ接地を接続した場合を考えた。そして、図 3 . 1 1 の電子ボリューム回路 2 を設計した。その際、抵抗 R 4、5、1 2、1 3、1 5 は 1 0 k にし、ノード番号 4、1 4 のバイアス電圧を  $-6\text{ v}$  にし、振幅を  $-12\text{ v}$  まで振れるように設計した。実際の数値は、図 3 . 1 2 になった。

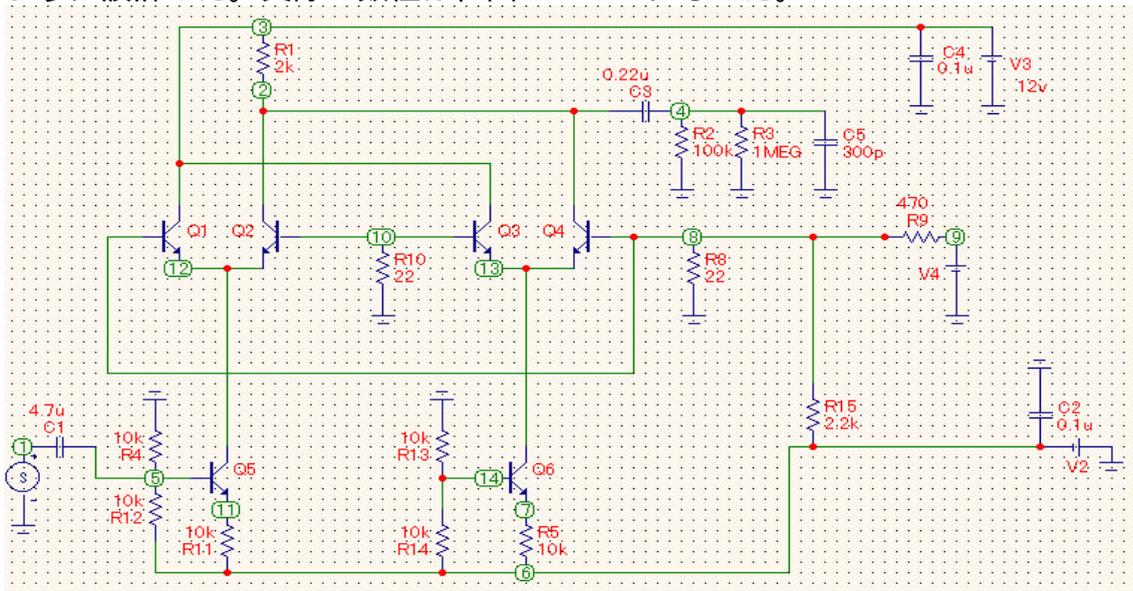


図 3 . 1 1 電子ボリューム回路 2

Micro-Cap V  
Transient Analysis of DENC12.CIR

Temperature= 27 V4.dc.value = 0

DC Operating Point Values

DC Operating Point Voltages

Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Voltage
1	0	2	11	3	12	4	0
5	-6.03	6	-12	7	-6.78	8	-0.114
9	0	10	-0.000222	11	-6.78	12	-0.757
13	-0.757	14	-6.03				

Bipolar Junction Transistors

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
IB	6.32e-008	5.05e-006	5.05e-006	6.32e-008	5.17e-006
IC	6.32e-006	5.05e-004	5.05e-004	6.32e-006	5.17e-004
VBE	6.43e-001	7.57e-001	7.57e-001	6.43e-001	7.57e-001
VBC	-1.21e+001	-1.10e+001	-1.20e+001	-1.11e+001	-5.27e+000
VCE	1.28e+001	1.17e+001	1.28e+001	1.17e+001	6.03e+000
BETADC	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002
GM	2.44e-004	1.95e-002	1.95e-002	2.44e-004	2.00e-002
RPI	4.09e+005	5.12e+003	5.12e+003	4.09e+005	5.00e+003
RX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
RO	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012
CPI	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CMU	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CBX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CJS	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
BETAAC	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002
FT	3.89e+015	3.11e+017	3.11e+017	3.89e+015	3.18e+017

	Q6
IB	5.17e-006
IC	5.17e-004
VBE	7.57e-001
VBC	-5.27e+000
VCE	6.03e+000
BETADC	1.00e+002
GM	2.00e-002
RPI	5.00e+003
RX	0.00e+000
RO	1.00e+012
CPI	0.00e+000
CMU	0.00e+000
CBX	0.00e+000
CJS	0.00e+000
BETAAC	1.00e+002
FT	3.18e+017

図3.12 図3.11の電子ボリューム回路2の各値

図3.11で示された電子ボリューム回路2の電圧利得は図3.7の電子ボリューム1と同様に制御電圧を上げることにより下がっていくだろうと予想し、ノード番号4の出力電圧のAC解析を行なった。AC解析設定ボックスには図3.7で示された電子ボリューム回路1と同じ入力をし、X軸とY軸の範囲を

autoと入力した。そして、図3.13のAC解析結果が得られた。

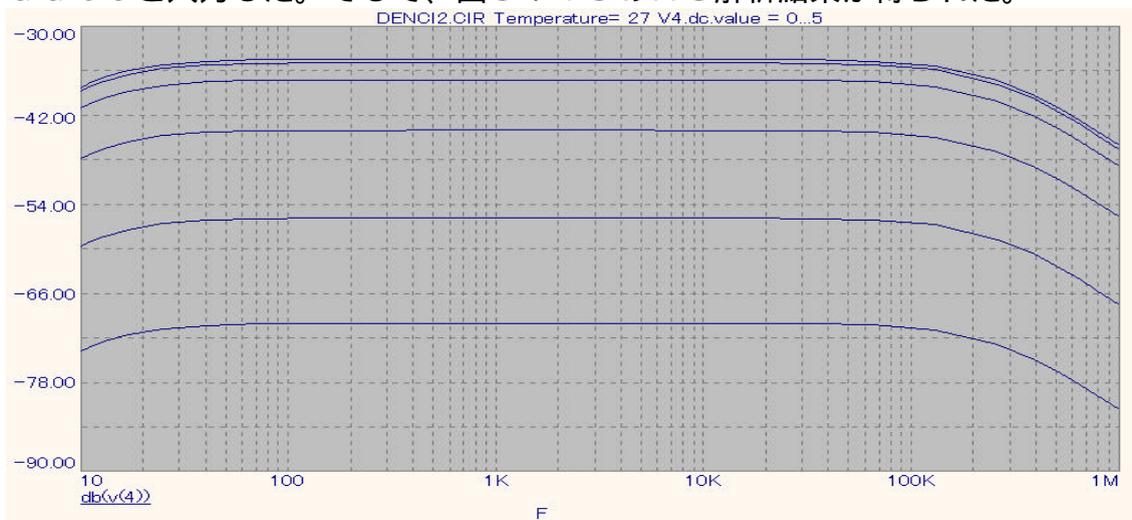


図3.13 図3.11電子ボリューム回路2のAC解析結果

図3.13の結果から、図3.11の電子ボリューム回路が制御電圧によって電圧利得を下げていることがわかった。

次に、図3.11の電子ボリューム回路2のエミッタ接地を、トランジスタnpnからpnpに変えて、エミッタホロアにした場合の電子ボリューム回路3を設計した。これを図3.4に示す。

図3.14の電子ボリューム回路3の各値は図3.15になった。

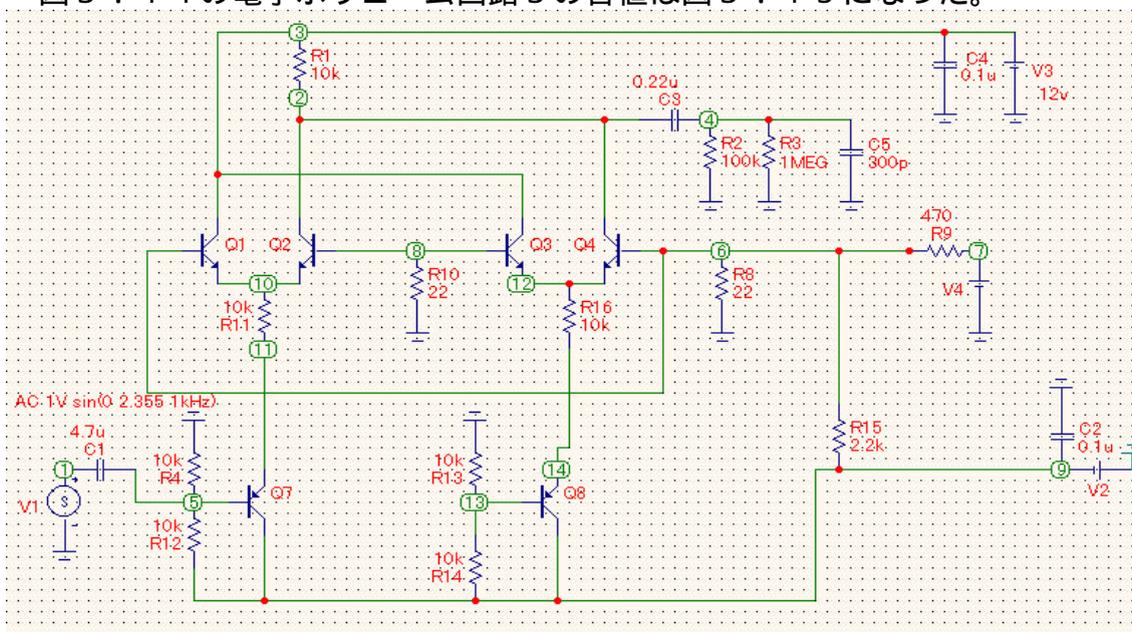


図3.14 電子ボリューム回路3

Micro-Cap V  
 Transient Analysis of DENCI3CI.CIR

Temperature= 50 V4.dc.value = 0

DC Operating Point Values

DC Operating Point Voltages

Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Voltage	Node	Voltage
1	0	2	7.51	3	12	4	0
5	-5.98	6	-0.114	7	0	8	-0.000194
9	-12	10	-0.72	11	-5.26	12	-0.72
13	-5.98	14	-5.26				

Bipolar Junction Transistors

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q7
IB	7.54e-008	4.42e-006	4.42e-006	7.54e-008	4.49e-006
IC	7.54e-006	4.42e-004	4.42e-004	7.54e-006	4.49e-004
VBE	6.06e-001	7.20e-001	7.20e-001	6.06e-001	-7.20e-001
VBC	-1.21e+001	-7.51e+000	-1.20e+001	-7.62e+000	6.02e+000
VCE	1.27e+001	8.23e+000	1.27e+001	8.23e+000	-6.74e+000
CJS	0.00e+000				
BETAAC	1.00e+002				
FT	2.57e+017				
GM	2.71e-004	1.59e-002	1.59e-002	2.71e-004	1.61e-002
RPI	3.69e+005	6.30e+003	6.30e+003	3.69e+005	6.20e+003
RX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
RO	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012	1.00e+012
CPI	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CMU	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CBX	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
CJS	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000	0.00e+000
BETAAC	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002	1.00e+002
FT	4.31e+015	2.53e+017	2.53e+017	4.31e+015	2.57e+017
	Q8				
IB	4.49e-006				
IC	4.49e-004				
VBE	-7.20e-001				
VBC	6.02e+000				
VCE	-6.74e+000				
BETADC	1.00e+002				
GM	1.61e-002				
RPI	6.20e+003				
RX	0.00e+000				
RO	1.00e+012				
CPI	0.00e+000				
CMU	0.00e+000				
CBX	0.00e+000				
CJS	0.00e+000				
BETAAC	1.00e+002				
FT	2.57e+017				

図3.15 図3.14の電子ボリューム回路3の各値

図3.11と同様な結果が得られると予想し、図3.14電子ボリューム回路3のAC解析をシミュレートした。その際、AC解析設定ボックスは図3.11の電子ボリューム回路2と同様に入力し、X軸とY軸の範囲は、autoと入力した。そして、AC解析は図3.15になった。

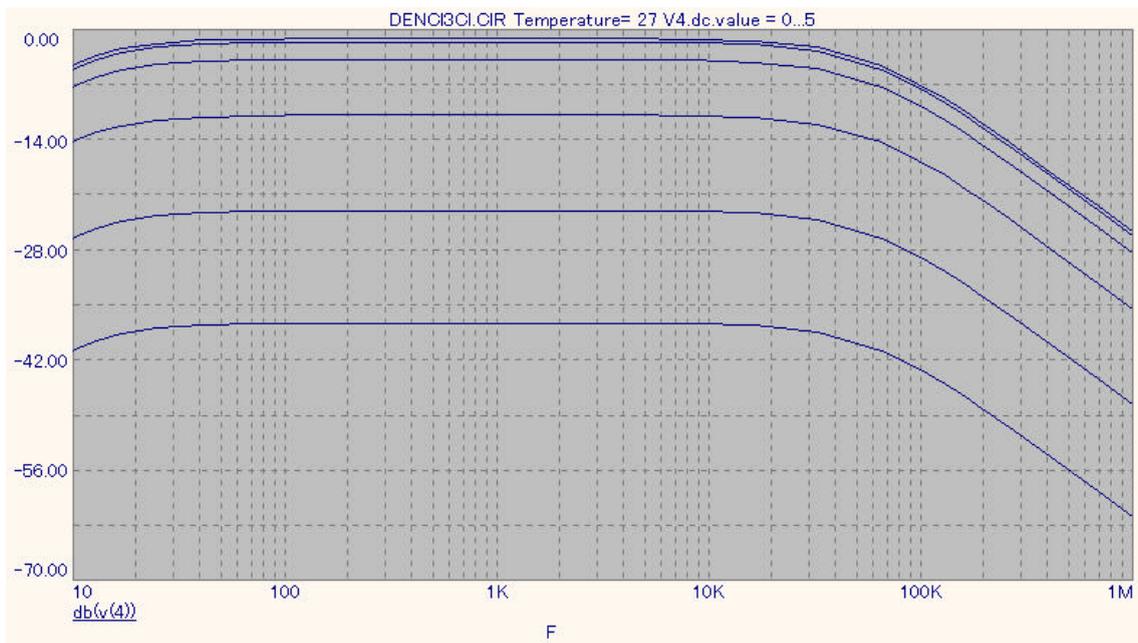


図3.16 図3.14の電子ボリューム回路3のAC解析結果

実際に、制御電圧が上がり、電圧利得が下がることがわかった。

## 第4章 電子ボリューム回路製作

まず、電子ボリューム回路2と3のパターンをCADというソフトを用いて作製した。しかし、感光基板一枚で、2つの回路を作製する予定であったが、素子と素子の間隔が広すぎて、入りきらなかった。回路の銅板部分の線を細くしすぎ、穴が開けにくいことに気付いた。そこで、最終的に作製したパターンは、銅板部分の線を太くし、抵抗やコンデンサの下に、ジャンパ線を通すことにより、回路を穴が開けやすくなり、それと共に、縮小した回路パターンになった。また、グラウンドや入力信号をかけれるよう線を通す予定の穴の大きさを縮小した。電子ボリューム回路1、2の設計と同様に、トランジスタからグラウンド部分に引く線を全てジャンパ線を強引に通して、その後の製作が、困難になった。そして、線を用意深く離れさせたことにより、作製したプリントパターンに余分な隙間ができてしまった。

しかし、プリント基板の大きさに電子ボリューム回路2と3が入りきったので、最終的にできたパターンを感光基板に焼き付けた。

次に感光基板にパターンを焼き付けた。まず、暗い所で、パターン・フィルムにパターンを貼り付けた。最初に、外で、太陽の光を浴びせ、10分過ぎて、うまく焼き付けたかを確認した。しかし、パターンがうまく焼き付けておらず、蛍光灯で30分焼き付けたが、うまくいかなかったので、新しい感光基板を使い、フィルムを密着させ、蛍光灯に30分浴びせることにより、パターンを焼き付かせることに成功した。

そして、現像液の中に感光基板を沈め、ゆっくり左右に揺らした。その際、温度計で25前後になるよう、こまめに、お湯を現像液の外部の容器に注入した。この作業を5分継続して行ない、水を浴びせながら、慎重に感光基板の感光膜を指で擦り落とした。

現像が完了したので、エッチングを行った。

エッチングとは銅を溶かす作業で、直接、手に触れると危険なので、ビニー

ル手袋を装着して、作業した。

最初に、エッチング液を入れた容器と、外側にそれより大きい容器を用意した。その際、外側の容器には、銅を溶けやすくするため、現像処理と同様に、25 前後の温度を保つため、こまめにお湯を注いだ。そして、静かに基板を、ビニール手袋を装着した手で、ゆっくり左右に擦った。五分以上過ぎ、基板を慎重に割り箸で擦り、銅を剥がした。次に基板を蛍光灯で露光し、再び、現像液にいれ感光膜を除去した。

次に、作製した基板の回路 2 つを、のこぎりで切り離した。その際、基板の側をやすりで削り、なめらかにしていき、形を整えた。その後、基板の各点をボール盤で穴を開け、素子を組み込める状態にした。

また、基板の配線が、ショートや断線していないか確認するため、テスターで確認した。その結果、電子ボリューム 2 の、抵抗 R 1 がアースに落ちる部分が、断線していたので、はんだをその部分に付け、導通させた。

そして、基板が完成し、素子を組み込み、はんだ付けする作業に移った。素子を組み込む場所をわかりやすくするため、予め、基板の裏にノード番号を記した。基板に素子を組み込んだ後、CAD で設計したプリントパターンに問題が見つかり、配線を断線させ、基板の表に線をつないぐことで、その問題を補うことができた。その後、実際に電子ボリューム回路 2 と 3 に入力信号、制御電圧、負電源、正電源、アースをそれぞれの電源に、接続して、ノード番号全ての電圧を測定した。しかし、Micro-Cap 5 / CQ でシミュレートした値と違う結果が得られた。その後、電子ボリューム 3 の pnp トランジスタの、ベースとコレクタとエミッタの付ける向きが反対であることを、トランジスタ規格表を見て気付き、付け替えた。また、電子ボリューム回路 2 のトランジスタを全て付け替えた。その結果、シミュレートと近似した値を得ることができた。

作製した回路は、図 4 . 1 と図 4 . 2 である。また、実際に測定した電圧値は表 4 . 1 と表 4 . 2 の値になった。



図 4 . 1 . 1 実際に作製した電子ボリューム回路 2 の表面

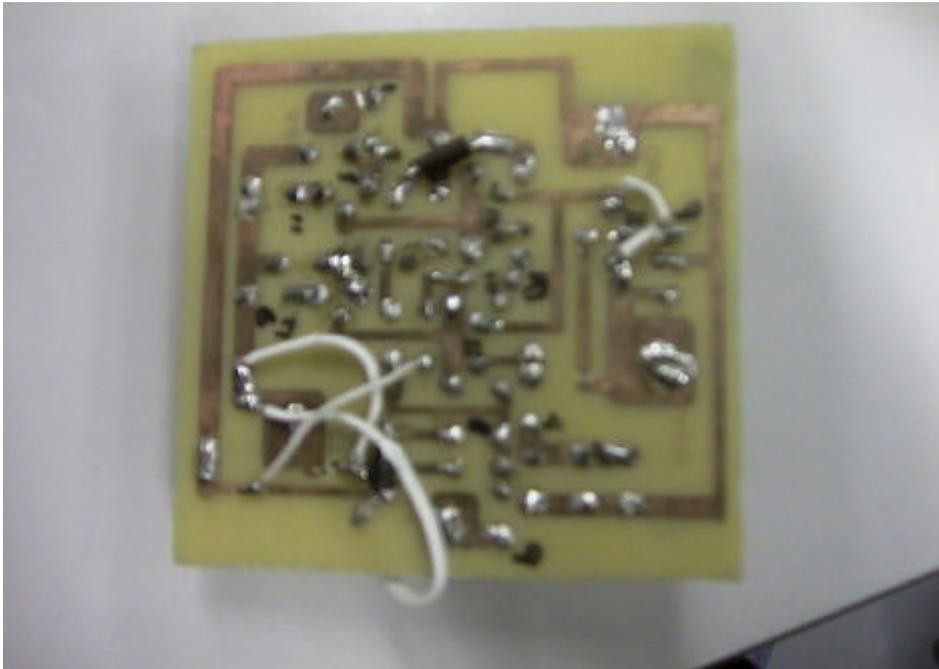


図 4 . 1 . 2 実際に作製した電子ボリューム回路 2 の裏面

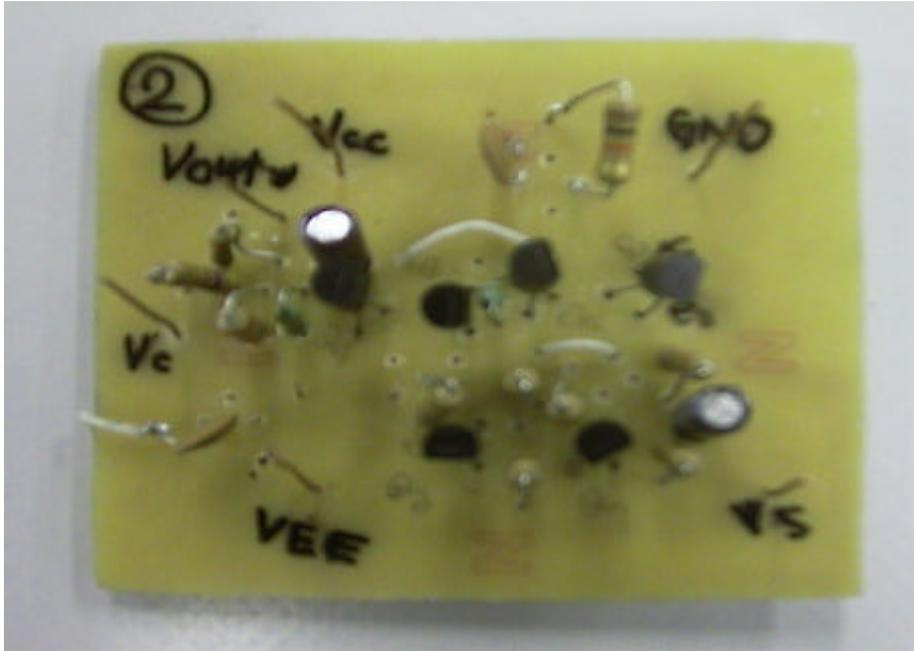


図 4 . 2 . 1 実際に作製した電子ボリューム回路 3 の表面

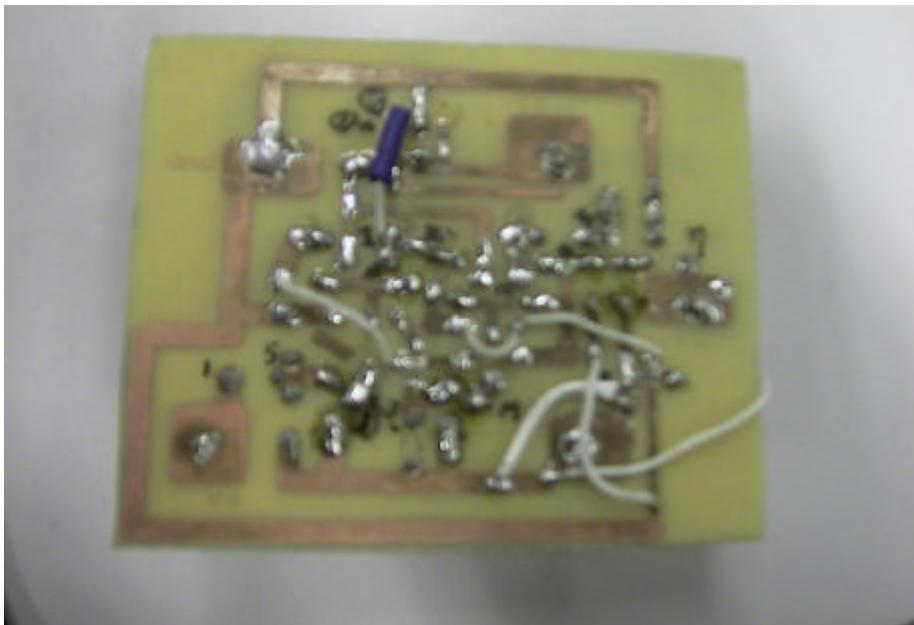


図 4 . 2 . 2 実際に設計した電子ボリューム回路 3 の裏面

表 4 . 1 電子ボリューム回路 2 の実測電圧値

ノード番号	電子ボリューム回路 2 の 実測電圧 ( v )
1	0、4 m
2	1 0、9 2
3	1 2
4	0
5	- 6、0 1
6	- 1 2
7	- 6、0 6
8	- 1 1 5 m
9	6 m
1 0	- 0、3 m
1 1	- 6、6 5
1 2	- 0、6 3
1 3	- 0、6 3
1 4	- 6、0 3

表 4 . 2 電子ボリューム回路の実測電圧値

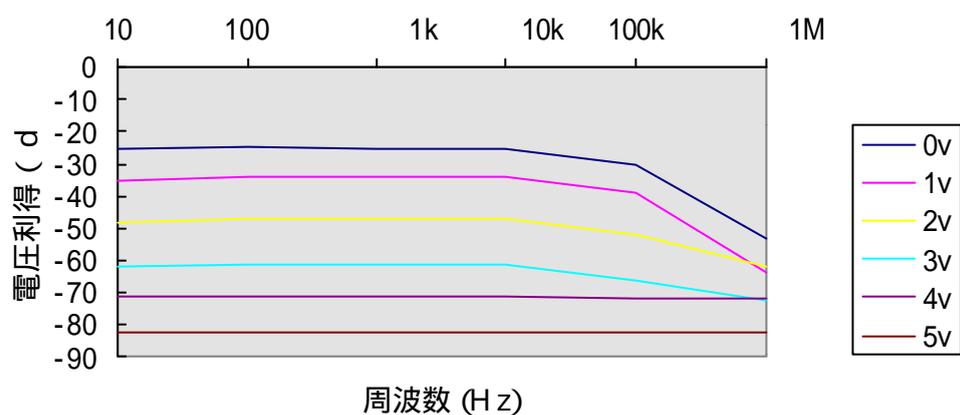
ノード番号	電子ボリューム回路 3 の 実測値 ( v )
1	0
2	7、0 9
3	1 1、9 9
4	0、1 m
5	- 5、9 6
6	- 1 1、3 m
7	0、1 m
8	- 0、1 m
9	- 1 2
1 0	- 0、6 1
1 1	- 5、3 5
1 2	- 0、6 1
1 3	- 5、9 7
1 4	- 5、3 7

## 第5章 結果

作製した電子ボリューム回路2の電圧利得を実際に測定した結果、制御電圧を変化させても、何も変化が得られなかった。

次に、電子ボリューム回路3の電圧利得を実際に測った。

電子ボリューム回路3の電圧利得実測値



実際に、測定した電子ボリューム回路3の電圧利得は、制御電圧を、0 v から 5 v に変化させた場合に減少しているが、シミュレートした値と異なった。

## 第6章 総括

1．電子ボリューム回路を設計し、製作することにより、差動増幅器の原理を学ぶことができた。

2．今後、歪み率を測定していないので、今後、測定するとともに、なぜ、シミュレーションどうりいかなかったかを、考察していきたい。

## 謝辞

本研究の遂行及び本論文の作成に際し、終始懇切なご指導、御教導を賜りました綿森道夫助教授に深甚なる感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、数章のご助言、ご討論を賜りました高知工科大学工学科八田章光助教授に感謝の意を表します。

また、高知工科大学電子・光システム工学科在学中に御指導を賜りました原学科長に心から感謝いたします。

最後に高知工科大学電子・光システム工学科在学中、本研究の実験遂行、各過程で終始ご厚意、ご協力を頂いた高知工科大学電子・光システム工学科、平木昭夫教授・河津哲教授・河東田隆教授・神戸宏教授・成沢忠教授・矢野政顕教授・畠中兼司教授・西本俊彦教授・橘昌良助教授・野中弘二助教授・井上昌昭助教授・関口晃司助教授・笠原泰講師・武田光由実験講師・西田兼助手の方々に重ねて感謝の意を述べさせていただきます。

また、本研究を遂行するにあたり、細部にわたり実験にご協力頂いた、梅村佳克氏、久保格致氏、嶋真秀氏、長谷川和也氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) トランジスタ技術 No. 56 電子回路シミュレータ活用マニュアル
- 2) 黒田 徹 著 「はじめてのトランジスタ回路の設計」
- 3) 藤村 安志 「トランジスタ・IC超入門」
- 4) 高野 政道 「これでわかった トランジスタ・IC回路の見方・考え方」
- 5) 坂本 康成 「基礎から学ぶ 電子回路」
- 6) 村田 正 「電子回路の基礎」