卒業研究報告

題 目

Micro-Cap 5 / CQ を用いた オペアンプの設計と製作

指導教官

綿森道夫助教授

報告者

嶋 真秀

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	E 序	「論		1
第2章	f t	自幅回足	备	2
2	- 1	増幅回	回路とは ······	2
2	- 2	トラン	ノジスタの基本公式 <i></i>	2
2	- 3	接地方	う式の分類	3
	2 - 3	3 - 1	エミッタ接地	3
	2 - 3	3 - 2	ベース接地	3
	2 - 3	3 - 3	コレクタ接地	3
2	- 4	A 級重	助作	4
2	- 5	B 級重	助作	5
2	- 6	C 級重	助作	5
第3章	t 応	5月回日	备	6
3	- 1	CR 🗖]路	6
3	- 2	直結回	□路······	6
3	- 3	ダー!	Jントン接続回路	7
3	- 4	カレン	ノトミラー回路	8
3	- 5	差動均	曽幅回路 ······	8
3	- 6	コンス	プリメンタリ回路	10
第4章	E 1	石増帷	富回路·······	11
4	- 1	今、	1 石増幅回路をする理由	11
4	- 2	1石均	曽幅回路とは ······	11
4	- 3	シミニ	ュレーションの結果と実測の結果	13
	4 - 3	3 - 1	トランジェント解析	13
	4 - 3	3 - 2	各ノードの電圧値 <i></i>	13
	4 - 3	3 - 3	周波数特 性 ······	14
	4 - 3	3 - 4	歪み率特性	14
	4 - 4	↓ 考察	·····································	16

第5章 💈	プリント基板の作成	 17
5 - 1	プリント・パターンの作成	 17

5 - 2	パターンの焼き付け	18
5 - 3	現像	18
5 - 4	エッチング	19
5 - 5	基板の穴あけ及び、部品の取り付け <i></i>	19
5 - 6	確認	20

第6章	5石	オペ	アンプ・・・・・・			····· 2 1	
6 - 1	5	石才	ペアンプとは				1
6 - 2	シ	ィミュ	レーションの約	吉果と実測の結	果		3
6 -	2 -	1	トランジェン	~解析			3
6 -	2 -	2	各ノードの電圧	E値			4
6 -	2 -	3	周波数特性 꺂				5
6 -	2 -	4	歪み率特性 …				5
6 -	2 -	5	周囲温度による	3出力電圧 <i></i>			6
6 - 3	考	察 "					7

第7章	8 石オペ	ペアンプ …	••••••		 ······ 2 8
7 - 1	8石ス	tペアンプと	は		 ····· 28
7 - 2	2 シミニ	ュレーション	の結果と実測	の結果 <i></i>	 29
7 -	2 - 1	トランジェ	ント解析 <i></i>		 ····· 29
7 -	2 - 2	各ノードの	電圧値		 30
7 -	2 - 3	周波数特性			 31
7 -	2 - 4	歪み率特性	•••••		 31
7 -	2 - 5	周囲温度に	よる出力電圧	•••••	 ······ 32
7 - 3	3 考察 ·				 33
結言 …					 34
参考文南	ť				 35
謝辞					 36

第1章 序論

回路の歴史を辿って行くと、現在、主流になっているのは、IC や LSI という 集積回路である。これらの集積回路が登場した背景には、真空管やトランジス タといったアナログの活躍のおかげである。ディジタル IC のみならず、今でも、 真空管やトランジスタは使われている。

アナログだけの回路を作りたいと考えた時、簡単にアナログ回路が設計出来な いかどうかを調べていたら、それは、オペアンプを使った回路であった。なぜ なら、オペアンプに1つの抵抗を加えるだけである。それに、オペアンプに限 らず、すべてのICについて言える事は、オペアンプを使う人はオペアンプの中 身、つまり内部の回路でトランジスタと抵抗がどのようになっているのかは、 特に知る必要がない。その上、入出力、電源、その他が、どのリード線(ピン) に割り当てられているか、定格はどのくらいかを規格表で調べるだけで使える のである。中身が分からなくても、入出力がはっきりしているものをブラック ボックスと捉える事が出来る。つまり、オペアンプに限らず、ディジタルICと 呼ばれるもののほとんどは、ブラックボックスともいえ、動作が理解出来れば、 中身を知らなくても、その回路の働きが分かるようになる。

しかし、このまま、回路のブラックボックス化が進めば、ちょっとしたトラブ ルに遭遇した時の対処が難しくなるのではないかと危惧している。対処法は、 幾つか挙げられるが、まずは、中身を理解する事が、一番、早いのではないか と考えた。部品の小型化が進む現代の社会において、IC などのブラックボック スと呼ばれる部品を選ぶ時に、その真価を発揮できるかも知れないし、ディジ タル回路の時代にも不安なく対応できる様になるかも知れない。

研究の目的として、まず、アナログ IC の代表であるオペアンプの内部がどの 様になっていて、また、どの様に動作をしているのかを知る。それには、回路 シミュレータ Micro-Cap 5を用いて、設計した回路のシミュレーションを行う 事である。さらに、目標として、簡単に回路が読めるようになる事、これまで 学んできた回路を生かして、オリジナルの回路を自分の力で考える様にする事 である。

第2章 增幅回路

2-1 増幅回路とは

増幅回路の働きを簡単に言えば、小さな電圧の変化を大きな電圧の変化に変える事である。

例えば、1mVの入力電圧が入ると、出力電圧が1Vになったとする。この 増幅率は、出力電圧/入力電圧 で求める事が出来る。この式により、1000 倍に増幅されたことになる。この増幅度の事をゲインといい、一般にはデジベ ル(dB)という単位で使われる。

次に示す式は、電圧、電流の増幅度のデジベル(dB)を求める式である。

ゲイン = $20 \log_{10} \times \frac{Vout}{Vin}$ Vin:入力電圧 Vout:出力電圧

・電流の増幅度の求め方・

ゲイン = $20 \log_{10} \times \frac{Iout}{Iin}$ Iin:入力電流 Iout:出力電流

上式を用いると、10 倍は 20dB、1000 倍は 60dB と求める事が出来、また、 - 0.1 倍は - 20dB、 - 0.001 倍は - 60dB と求められる。

2-2 トランジスタの基本公式

1) 直流電流増幅率

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

上式を用いると、ベース電流とコレクタ電流の値が分かる。 例えば、ベース電流が100µAで、電流増幅率が100だとすると、コレクタ 電流には10mA流れるようになっている。

2)エミッタ、コレクタ、ベースの電流の関係 $I_E = I_C + I_B$

2-3 接地方式による分類

2-3-1 エミッタ接地

ベースに順方向のバイアス電圧をかけて、バイアス電流を流し、その上に信 号電流を重ねて流す。コレクタ側には、負荷抵抗器と電源を接続して、増幅さ れた信号電力を取り出すことによって出来る回路である。

< エミッタ接地の特徴 > 入力インピーダンスは低い。 出力インピーダンスは高い。 電圧利得、電流利得が大きい。

2-3-2 ベース接地

<ベース接地の特徴> 入力インピーダンスは低い。 出力インピーダンスは高い。 電圧利得は大きいが、電流利得は小さく約1である。

2-3-3 コレクタ接地

別名、エミッタフォロワと呼ばれる。エミッタフォロワは、負荷抵抗がトランジスタのエミッタ側とアース側の間にある回路である。

<エミッタフォロワの特徴>

入力抵抗が極めて高い。

電圧ゲインはほぼ1である。

ひずみが少ない。

周波数に対する特性がよい。

電圧ゲインでなくても電流ゲインが高いので、ステレオ・アンプ等の出力回路に使われる。

信号源が交流の場合、入力抵抗、出力抵抗のことをそれぞれ入力インピーダンス、出力インピーダンスと呼ぶ。このインピーダンスとは交流的な抵抗の事であるが、信号源の電力を最も効率よく効率よく伝えるには、出力インピーダンスと入力インピーダンスを同じ値にする必要がある。

エミッタフォロワは、入力インピーダンスが高く出力インピーダンスが低いの が特徴である。この特徴を生かして、出力インピーダンスが高く入力インピー ダンスが低く、直接接続出来ないようなときに、間に入れて、使うことがある。

2 - 4 A 級增幅回路

トランジスタに正のバイアスをかけることにより入力信号の波形を損なうこ となく全周期にわたって増幅する回路で

1)固定バイアス回路

2)自己バイアス回路

の2つの回路方式がある。

1)固定バイアス回路

入力端子に微少な電圧変化を与えると、ベースには直流電圧にその変化が表 れる。

ベースの電圧が変化すると、ベース電流も変化し、コレクタ電流が変化する。 すると出力端子に直流電圧の大きな変化となって入力信号が表れる。

< 固定バイアス回路の特徴 > 回路が簡単。 電流損失が少ない。 ゲインが高い。 温度による安定度は良くない。

2) 自己バイアス

自己バイアス回路は固定バイアス回路と同じようにバイアス電圧をトランジ スタのコレクタに与えていて、形も似ているが、バイアス抵抗がトランジスタ のコレクタからベースに接続されている。

<自己バイアス回路の特徴> 入力抵抗が下がる。 ベースに出力電圧の一部が負帰還されるため、電圧ゲインが下がる。 温度による安定度がよい。 周波数特性がよい。 雑音、ひずみが少ない。

3)電流帰還バイアス回路

固定バイアス回路のベース、エミッタと電源のマイナス極の間に抵抗を接続した回路と同じ構造をしている。ベースとマイナス極に接続されている抵抗には、ベース電流の10~15倍の電流が流れている。

電流帰還バイアス回路の特徴を次頁に示す。

<電流帰還バイアス回路の特徴>

電圧ゲインは低くなる。 周波数特性がよい。 温度変化に対して安定している。 入力抵抗は下がる。 雑音、ひずみが少ない。 回路が複雑になる。 電流損失が大きい。

2 - 5 B級增幅回路

バイアスをほとんどかけずに動作させるため、入力信号の半周期しか出力され ない。このため B 級増幅は通常 2 つのトランジスタを対称に接続し、半周期ず つ交互に動作させるプッシュプル方式で使用される。プッシュプル増幅は少な いひずみで大きな出力を取り出せるため、オーディオアンプなどでよく使われ る。

A 級増幅回路では、無信号時にも一定のコレクタ電流が流れるため直流の消 費電力が大きく電源効率も悪い。これに対して、B 級増幅回路では信号の入っ た時だけしかコレクタ電流が流れないため、電力の無駄が少なく、電源効率の よい増幅を行える。

B 級プッシュプル増幅回路は、同じ特性の2個のトランジスタを用い、上下 対称形に組み合わせたもので、歪みのない正弦波出力が得られる。また、出力 をあげる回路の終段に持ってくる事が多いのもこの回路の特徴である。

2 - 6 C級增幅回路

負のバイアスをかけるため入力信号の半周期よりもさらに短い期間しか出力 されない。また、出力波形が入力波形と相似になるような回路には適さない。 このためひずみや高調波が多く含まれるが、効率が高いので送信器などに使わ れる。また、高い電源効率が得られるだけでなく、バイアス回路が簡単に出来 る。

第3章 応用回路

これまで登場した増幅回路は、1段増幅のためゲインも100倍前後しか取れない。これ以上の電圧ゲインを得るには、1段増幅をもう1段以上接続する必要がある。

3 - 1 CR結合回路



Q1 と Q2 の両トランジスタは R3、R4 のバイアス抵抗により固定バイアス方 式で動作をしている。C2 のコンデンサは、Q1 のコレクタ出力交流電圧を Q2 のベース入力とすると同時に、直流的に結合しないように阻止する働きをする。 C4 と C5 のコンデンサは交流ゲインを大きくするために使用している。

C1 と C2 のコンデンサは、交流電流だけを通し、直流電流が流れない性質が ある。Q1 のトランジスタの負荷に抵抗を使い、コレクタ側に起きる電圧変化を Q2 のトランジスタの入力へコンデンサで結合する方式である。

< CR 結合回路の特徴 > 周波数特性が良い。 ひずみが少ない。 インピーダンスが不整合のため、損失が大きい。 電力消費のため、電力効率が悪い。

3-2 直結回路

CR 結合回路は、トランジスタとトランジスタの間に、結合コンデンサを用いているので、低域で利得が減少する。また、コンデンサは、直流をカットして、 交流成分だけを通す役割があるため、直流分を含んだ信号の増幅には適していない。 この欠点を解決したのが、下図のようにコンデンサを介さないで、直接結合 する。但し、1段目にあるQ1のトランジスタのコレクタ電圧がそのまま2段目 にあるQ2のトランジスタのベース電圧になる。このため、1段目にあるトラン ジスタの動作点の変動がそのまま増幅されてしまうので、直結増幅器の設計に 当たっては、バイアスの安定のため、最初に各部の電圧と電流を定める必要が ある。



3-3 ダーリントン接続回路



(a) スイッチング

(b) ダーリントン接続

上図の(a)は、トランジスタの特徴の一つであるスイッチングである。トラ ンジスタQ1に順方向電圧約0.6Vを加えると、トランジスタQ1が動作する。 少ない入力電流で大きな電流を出したいときには、(a)では電流増幅率に限 界があり、今以上の電流を出すことが出来ない。これを改善したのが、(b)の ようにトランジスタQ1とQ2を2個接続する方法である。出力には、それぞれ のトランジスタの電流増幅率hfe1とhfe2をかけた電流増幅率がQ3の電流増幅 率となる。トランジスタの電流増幅率を上げる回路である。これにより、小さ なベース電流でも非常に大きなコレクタ電流を取り出すことが出来る。 ダーリントン接続回路は、大きな電流増幅率を持っているため、大きな電流 を必要とする出力スピーカ駆動用にも使われる。

3-4 カレントミラー回路

同相成分(CMRR)が大きく取れるカレントミラーまたは、電流反射鏡は、 コレクタ・ベース間を短絡したトランジスタのコレクタ側へ電流を印可し、そ のコレクタ・ベース端子に近接したほかのトランジスタのベース端子に接続す る回路である。下図に、カレントミラー回路を示す。



上図のように R1、R2 の抵抗に I1、I2 の電流があったとする。この 2 つの電流は、R の抵抗によって流れる電流値が決まっており、I1 と I2 の電流値は、同じ電流値になる。なお、トランジスタは同じトランジスタを用いる。また、R1、R2 の抵抗にかかる Ve1、Ve2 のエミッタ電圧は、周囲の温度に対して大きく変動する事がない。

欠点として、アーリ効果、ベース電流、入力電流のばらつきによっては高精 度のミラー回路が実現できない。また、出力回路の直流電位による電圧依存性 がある。これは、入力電流値により変化する。

3-5 差動増幅回路

次頁に示す図のように、入力が NI と INV の 2 本あり、その差信号を増幅した回路である。つまり、反転増幅動作と非反転増幅動作を同時に行った時に出来る 2 つの入力電圧間の差減圧を増幅する回路である。



上図の回路に R1、R2、Re の各抵抗に流れる電流を I1、I2、Ie とすると、Ie の電流の値は、I1 と I2 の電流の和を足したものである。

但し、Q1 とQ2 のトランジスタは同じトランジスタで、かつ、R1 と R2 の抵抗は、同じ値の抵抗を用いることが条件である。また、Q1 と Q2 のトランジスタの入力電圧が一方よりも大きいと、回路が動作しない。

<差動増幅回路の特徴>

回路の全体が平衡である。

入力信号に対して個々のエミッタ電流は変化するが、アース回路や電源回路 には打ち消し合って信号成分が流れない。

最大利得は電源電圧で定まる。

増幅だけはなく2つの入力に同時に入る雑音などの同相成分を取り除く能力 がある。

差動増幅回路は、カレントミラー回路と組み合わせる事により、利得を上げ る事ができる。これは、カレントミラー回路をトランジスタのコレクタ側に負 荷(アクティブ負荷)として持つ差動増幅器の方が電源電圧に関係なく高利得 を実現できるからである。

3-6 コンプリメンタリ回路

オーディオアンプによく使われる。なぜなら、特性が対称な NPN と PNP の トランジスタを組み合せることによって、高出力でひずみの少ないアンプを作 ることが出来るからである。



上図は、コンプリメンタリ回路である。Q1のトランジスタのベース電圧が正 電圧のとき、電流が流れるが、Q2のトランジスタには電流が流れない。逆に、 ベース電圧が一定の電圧になったときは、Q2のトランジスタに電流が流れる。 つまり、Q1とQ2のトランジスタが交互に働くのがこの回路の特徴である。

第4章 1石増幅回路

4 - 1 今、1石増幅回路をする理由

簡単な回路である。 どこを改良すべき点かが分かる。 回路アレルギーにかからない 1石増幅回路だけでも動作が出来る 応用回路への挑戦

4-2 1石増幅回路とは

トランジスタ1個だけでも、回路が動作出来る。図4-2-1 に1石増幅回路の回路図を、図4-2-2 に製作した回路を示す。



図4-2-1 実際の1石増幅回路の回路図





図 4 - 2 - 2 実際の1石増幅回路の製作(上:表 下:裏)

- 4-3 シミュレーションの結果と実測との結果
 - 4 3 1 Transient Analysis 解析



出力は、入力と逆位相をなしている事が分かる。トランジスタのコレクタ側 に出力を持ってきた時には、入力が正に対し、出力は、反転される。 この時の増幅率は、約567倍。つまり、約55dBであった。

4-3-2 各ノードの電圧値



	シミュレーション(V)	実測(V)
ノード1	1.49	1.139
ノード2	0	7.76E-02
ノード3	9	9.000
ノード4	5.63	6.110
ノード5	0.725	0.634
ノード6	0	3.06E-01



実際に実測を行ったときの入力波形と出力波形を以下に示す。

4-3-3 周波数特性



実測値の周波数が100KHz までは、変化なし。実測値のカットオフ周波数は、 低域では、550Hz で、高域では、142.5KHz であった。なお、100KHz 付近か らが、実測のゲインが低下している。これは、周波数カウンタによる電圧降下 が発生していると考えられる。

4-3-4 歪み率特性

次頁に示す図は、入力電圧に対する出力電圧を示したものである。実測とシ ミュレーションが、一致していないが、発振器の歪み率によるものなので、実 際には、シミュレーションとほぼ一致している。



4-3-5 周囲温度による出力電圧の変化

周囲温度()	-100	-75	-50	-25	0
出力電圧(V)	6.27	6.15	6.02	5.89	5.76
周囲温度()	21	25	50	75	100
出力電圧(V)	5.65	5.63	5.49	5.35	5.22



このグラフより、入力電圧は、1V と小さいため、波形がはっきり現れていないが、出力電圧が高いためである。温度の変化に対する出力電圧は、さほど変化は見られない。

4-4 考察

温度特性をシミュレータした結果、さほど変化は見られなかった。それは、 この回路には、フィードバックがかかっているためである。

また、周波数に対するゲインについて、実測の結果から、この回路は、ゲインが低く、また、扱える周波数が、狭い事が分かった。

第5章 プリント基板の作り方

5-1 プリント・パターンの作成

方眼紙または回路作成ソフトを用いて、パターンの下書きをする。 下図は、8石オペアンプのパターンを方眼紙で書いたものである。



出来るだけ、回路図と同じ位置に部品を配置し、また、入力と出力は離してお くのがいい。トランジスタの足には向きがあり、方向を間違えない。トランジ スタの足の向きは、トランジスタの種類によって異なっているので、トランジ スタ規格表を見ながら、向きを確認する事で取り付けを行う。

ただ、回路図の配置通りに行かない部分があった。それは、

回路図で黒丸の接点と交わっていない(交差している)部分との区別 配線の長さと短さ それに部品と部品間の間をどれくらいあけるのか

であった。 については、プリント・パターンの完成後の回路がきちんと動作 しているかどうかを確認するのと、回路を調整するため、場合によっては抵抗 を可変抵抗に取り替えたり、大きな部品に変えたりする際に、隣の部品が当た るかも知れないからである。また、部品の中には、放熱の必要があるものもあ るが、今回の実験については、必要なかった。

パターンの作成が終わると、次は、パターンの焼き付けを行う。

5-2 パターンの焼き付け

実験手順

この作業は、出来るだけ薄暗い部屋で行う。

パターン・フィルムを、感光基板に裏返して固定させる。出来るだけ、基板 とフィルムを密着させる事で、基板にパターンを写す時間が早くなる。 太陽の光または、蛍光灯の光で焼き付けを行う。

今回は、太陽の光よりも、蛍光灯の方が早く焼き付けられた。太陽の光に関しては、太陽の光の強さに影響されるためか、ムラが出来やすく時間がかかる(通常、3分の所を20分かけても焼き付けられなかった。少しだけパターンが焼き付けられただけであった。)のと、昼間の間だけしか焼き付けられないので、時によっては不便であった。

基板にうすくパターンが表れたら、焼き付けの完了。次は、現像を行う。

5-3 現像

実験手順

現像液の用意。

が出来たら、感光基板を上にして液の中に完全に沈みこませる。ケースの 端を持って、左右に静かにゆすることで、作業が早くなる。ただし、現像には 時間をかけすぎない。かけすぎると、パターンが細くなったり、場合によって は断線したりするため、作業時間は1分を目安に行う。

パターン以外の感光膜が溶けたら、引き上げすぐに基板の水洗いをする。洗 いすぎはよくない。さっと洗う程度で。なお、洗い終わった基板は、光に当て てもよい。

次の作業であるエッチングをする前に基板の検査と修正をする。パターンが 細くなっていたり断線したりしている可能性もあるので、ここで修正しておか ないとエッチングした後では、手後れになるため、ここでは慎重に行う。

現像が完了したら、次は、エッチングを行う。

5-4 エッチング

エッチングは銅を溶かす強い薬品であるので、取り扱いに注意が必要。また、 エッチングは付着力が強いので、ビニール手袋やエプロンを身に付けて作業を 行った。

実験手順

エッチング液の用意

適用温度より低い状態のまま、作業を行うと、エッチングに時間がかかりす ぎて、次第には溶けるはずの銅がとけきれないままになってしまう。温度は絶 対に守る。

基板を沈めると銅が溶け始め、液が墨のように濁ってくる。現像のときと同じようにケースの端を持って左右に静かにゆする。

割り箸などを使い、いらない部分の銅が完全に溶けたらエッチングの完了。 水道の水を流し、よく乾かす。



5-5 基板の穴開け及び、部品の取り付け

注意した事は、トランジスタの真ん中の足を取り付ける穴の位置であった。 トランジスタ 2SA1015 ならび、2SC1815 の真ん中の足は、トランジスタ規格 表によりコレクタであるが、両端のベース、エミッタを先に穴をあけ、その中 心にコレクタを持って来る様にした。他に、極性のある電解コンデンサやダイ オードの向き、抵抗はカラーコードの読む方をプラス側に、許容差をマイナス 側に持って行き、電流の流れる向きに取り付けた。

5-6 確認

動作を確認する前に、製作した回路のチェックを行った。確認する事は、抵抗 の値、コンデンサの値、それに極性のある部品の向きが、間違っていないかど うか、また、導電テストを使用し、基板の配線が断線、ショートしていないか、 部品と部品の接触は起こってないかどうか確認を行った。

第6章 5石オペアンプ

6-1 5石オペアンプとは

1石増幅回路を改良する目的で、設計をした回路である。下に、実際の5石 オペアンプの回路図を示す。



図6-1-1 実際の5石オペアンプの回路図

初段に、Q1、Q2の差動増幅回路、Q3、D1、D2、Q5のカレントミラ ー回路、Q4のエミッタ接地回路を取り付けた回路である。差動増幅回路はP. 8を、カレントミラー回路はP.8をエミッタ接地は、P.3を参照。

実際の5石オペアンプを製作した写真を図6-1-2に示す。



図6-1-2 実際に製作をした5石オペアンプ

この回路をシミュレーションで解析した結果、ゲインが高すぎて、測定できない。このため、出力から入力にバッファーを作る事によって、ゲイン1の回路を作った。図6-1-3は、図6-1-2の回路を改良したものである。



直流バイアスを可変抵抗によって合わせる。

出力の一部を入力側に帰還させる事に よって、ゲイン1の回路が作れた。

入力の波形と改良する前の出力波形、及び、改良した出力波形を次頁に示した。



入力波形(T=21)





改良前の回路の出力波形

改良後の回路の出力波形

と では、どちらも出力波形に変化はさほど、変化は見られないが、 の 方が、多少、歪んでいる。また、実測を行った時の周囲の温度が、21 からか、 歪んでしまっているのが、分かり難い。しかし、トランジスタのような半導体 は、周囲の温度が上昇すると、電流が多く流れるという特徴がある。周囲の温 度に関しては、実測では、測定できなかったが、6-2-5 で、シミュレーシ ョンにて解析を行っているので、P.26を参照。

6-2 シミュレーションの結果と実測の結果

6 - 2 - 1 Transient Analysis 解析

5 石オペアンプの増幅率は、27.857 / 539.916u で、51595 倍となる。これ は、デジベルで表示すると、94.25 dB である。このままでは、ゲインが高すぎ て、測定器にかける事が出来ない。測定を容易にするため、図6 - 1 - 3 に示 す回路にて解析を行った。解析結果を図6 - 2 - 1 に示す。



図 6 - 2 - 1 Transient Analysis 解析

6-2-2 各ノードの電圧値(T=21)



各ノードの電圧

	シミュレーション (V)	実測1(V)	実測2(V)
ノード1	- 1 5	-15.00	-15.00
ノード2	13.7	13.50	13.49
ノード3	14.3	14.12	14.11
ノード4	1 5	15.00	15.00
ノード5	- 14.4	-14.34	-14.33
ノード6	13.7	13.51	13.50
ノード7	14.4	14.17	14.17
ノード8	14.3	14.25	14.25
ノード9	0	0.105	0.106
ノード10	0.607	0.737	0.628
ノード11	9.89E-06	-14.90	8.25E-02

前頁の各ノードの電圧値で、注目する点は、ノード9とノード11の電圧値 である。ノード9は、入力電圧で、ノード11は、出力電圧の一部を帰還させた ときの電圧である。実測1では、ノード11が-14.90Vとシミュレーションと 合わない。これを改善するため、R3を可変抵抗で取り付ける事によって、シミ ュレーションと合わせた。

6-2-3 周波数特性

以下に示す図は、5石オペアンプの周波数に対するゲインの関係について、 シミュレーション結果と実測の結果のグラフである。



このグラフから読み取れることは、300KHzまでは、どちらも変化なく、300 KHz付近から周波数を高くしていくと、実測のゲインが低下していることが 分かる。この原因は、測定系の原因で起きたためであるので、実際には、シミ ュレーションの結果とほぼ一致する。

6-2-4 歪み率特性

5石オペアンプの入力電圧に対する歪み率をシミュレーションの結果と実測の結果を次頁に示す。



このグラフから、シミュレーションと実測との値が一致していない。これは、 周波数カウンタの歪みが、0.4%持っており、これが、影響したと思われる。ま た、オペアンプ自身の歪み率は測れなかったが、極めて小さいことが分かった。 実測に関して、測定できたのは、歪み率計により扱えた入力電圧レンジが 0.3V から 3.0V までであった。これ以外のレンジでは、歪み率が 0.15%以内に 設計ができず、測定が困難であった。

6-2-5 周囲温度による出力電圧の変化

周囲温度()	-100	-75	-50	-25	0
出力電圧(V)	1.11E-02	8.82E-03	6.71E-03	4.64E-03	2.51E-03
周囲温度()	21	25	50	75	100
出力電圧(V)	5.87E-04	2.04E-04	-2.35E-03	-5.28E-03	-8.71E-03

実測では、周囲温度による出力電圧の変化を知る事が出来ず、シミュレータの力を借りて、測定を行った。以下に示す波形は、周囲温度の変化による出力 電圧の変化をシミュレーションで解析したものである。

シミュレーションの結果から、入力電圧と一致する温度は30 であった。

次頁に周囲の温度による出力電圧の変化を示す。



6-3 考察

直流バイアスは、可変抵抗を入れる事によってシミュレーションの解析結果と 合わせた。しかし、同じトランジスタでも、性能が一致するとは限らず、出力 をシミュレーションと合わせるのが大変であった。

1石増幅回路と比較して、1石増幅回路のカットオフ周波数が低周波は、 550Hz,高周波では、142.5KHzと使える周波数帯域が狭いに対し、5石オペア ンプでは、カットオフ周波数が938KHzと広く扱える事が出来た。ただ、この 値は、測定系の原因によるゲインの低下であり、実際には、もっと高いと言え る。また、周波数の歪み率も、1Vで7.1%に対し、0.32%と約22分の1に押さ える事が出来た。

第7章 8石オペアンプ

7-1 8石オペアンプとは

5石オペアンプに差動増幅回路を2段目に、コンプリメンタリエミッタフォ ロワ回路を終段に、また、終段の回路のバイアスを考えるときに、3段目にダ イオードを取り付けた回路で、5石オペアンプを改良する事を目標にした回路 である。

図7-1-1に示す図は、実際の8石オペアンプの回路図である。

回路図に電流の値を設計しているが、これは、抵抗の値を決めるのに、必要 である。実際、各それぞれの抵抗の値は、計算した値とは、多少、異なってい るが、それは、抵抗の部品はE-24系の中から選ばなくてはならないため、近 似の値の抵抗を選び、取り付けた。



図 7 - 1 - 1 実際の 8 石オペアンプの回路図

この回路をシミュレーションしたところ、ゲインが高すぎて、このままでは、 測定できない。そのため、出力から入力信号 INV に帰還をかけることによっ て、下図のようにゲイン1の回路を作った。

さらに、外部からの歪みを押さえるため、出力から入力信号のマイナス側に 取り付けた。



- 7-2 シミュレーションの結果と実測の結果
- 7 2 1 Transient Analysis 解析



出力には、正の極性が得られた。増幅率は、21.054 / 819.874E-6 = 25679 倍、 デジベルで表示すると、88.2dB と高利得である。



	シミュレーション(V)	実測1(V)	実測2(V)
ノード1	13.6	13.620	13.610
ノード2	-15	15.000	15.000
ノード3	15	-15.000	-15.000
ノード4	14.3	14.180	14.230
ノード5	-9.67	-9.230	-10.050
ノード6	1.31	1.455	1.293
ノード7	14.3	14.250	14.250
ノード 8	0	1.068E-01	1.041E-01
ノード9	0.629	-5.85E-04	-0.973
ノード10	-9.67	-9.210	-10.100
ノード11	2.29E-05	1.352E-01	-1.86E-01
ノード12	0.683	1.338	0.579
ノード13	-1.38	-1.455	-1.611
ノード14	-0.683	-1.017	-0.930
ノード15	-0.037	1.375E-01	-1.758E-01
ノード16	-0.71	-0.728	-0.890
ノード17	-13.5	-13.440	-13.460
ノード18	-9	-9.280	-9.660
ノード19	-12.9	-12.930	-12.850
ノード20	0.635	5.90E-03	-1.614E-01

実測1は、R3に可変抵抗を取り付ける前を実測したもの、実測2は、R3に 可変抵抗を取り付けた時の実測である。周囲の温度は、21 である。



このグラフにより、490KHz までは、シミュレーションとは変化なしでした。 10KHz 付近で、実測値のゲインが低下しているが、約 - 1dB つまり、入力に対 して約 90%の 0.85V であり、これは、考慮する事はないと言える。

このグラフによる実測値のカットオフ周波数は、622KHz である。この周波数は、GB 積すなわち、周波数帯域積とも言い、使える周波数は、622KHz とも言える。

7-2-4 歪み率特性

8石オペアンプの入力電圧に対する歪み率を次頁に示す。 実測とシミュレータの歪み率が異なっている。これは、発振器の歪み率による ものなので、実際には、シミュレータとほぼ一致するはずである。



7-2-5 周囲温度による出力電圧の変化

周囲温度()	-100	-75	-50	-25	0
出力電圧(V)	2.33E-04	1.88E-04	1.48E-04	1.09E-04	6.88E-05
周囲温度()	21	25	50	75	100
出力電圧(V)	3.35E-05	2.65E-05	-2.00E-05	-7.24E-05	-1.33E-04

周囲温度による出力電圧の変化を次頁に示す。



周囲温度による出力変化

上図の解析結果から、40 付近で入力信号と一致する。実際、実験する時の 温度は、21 と40 に比べ、低い環境で行っている。さらに、温度が低下する と、出力電圧が上がっている事が解析結果から分かった。

7-3 考察

5石オペアンプを改良する目的で、設計した回路だったが、予想以上の収穫が 得られた。まず、周波数特性について、5石オペアンプが300KHz で、実測値 のゲインが低下し始めるのに対し、8石オペアンプでは、490KHz と周波数が 伸びている。ただ、カットオフ周波数が5石オペアンプの938KHz に対し、8 石オペアンプ回路では622KHz と低い。出力にパイパスコンデンサを取り付け て、低周波や直流をカットしたりするなどの対策を施したが、周波数カウンタ からくる電圧降下や歪みの影響が出力に響いたものと考えられる。しかし、 622KHz という値は、高周波でも、大きな周波数帯に属しており、この結果は、 満足している。

結言

この本研究を通じて、

同じ性能を持つトランジスタでも、実際に製作をして、実測をして見ると、 僅かではあるが、これが、回路全体に影響を与える事が分かった。

回路の概念が分かり、回路の要領がつかめた。

回路の設計をするだけではなく、実際に製作を行う事で、回路の考え方や動作の仕組みを理解する事が出来た。

計測器から発する微少電圧、電流は、無視できる小さな値であった。しかし、 この値が、回路に影響を与えていることが分かった。

周波数カウンタ 金み 0.4% 入力電圧 0.39mV

回路シミュレータの使い方をマスターした。

少しのトランジスタや抵抗、それにダイオードを取り付けるだけで、回路が 動作する事は驚いたが、これが、自信につながった。

1つ 残念だった事は、8石オペアンプが思い通りにいかなかったことである。これまで学んできた回路を根本から見直して、改良を加えたが、測定器からくる微少電圧と、個々のトランジスタの性能が僅かながら異なっている事が分かり、これが、うまく動作しなかったと考えられる。

しかし、回路の設計からプリント基板の作製という一連の作業を行った事、 回路がうまく動作しなかった問題点の解決に向けて、取り組んだ事など、それ らすべてが、自分を大きく育ててくれた。

参考文献

- 1.黒田 徹 著 「はじめてのトランジスタ回路の設計」
- 2.藤井信生 基礎シリーズ「電子回路入門」
 3. 鈴木 雅臣 定本 トランジスタ回路の設計

- 4. 奥澤 熙 著 はじめて作るアンプの設計 5. 小高明夫・佐藤邦夫著 SPICE による電子回路の基礎
- 6. 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
- 7. 2000 年版 最新トランジスタ規格表

使用したシミュレータソフト 1. Micro-Cap 5 / CQ SpectrumSoftware 社

謝辞

本研究の遂行と本論文の作成に際し、終始懇切なる御指導、御教示を賜った 高知工科大学工学部電子・光システム工学科綿森道夫助教授に深甚なる感謝の 意を表します。

本研究全般の遂行にあたり、数章のご助言、ご討論を賜った高知工科大学工 学部電子・光システム工学科八田昭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ご指導を賜った原央学 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・西田謙助手の方々 には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いただいた梅村 佳克氏、久保格致氏、新田敏弘氏、長谷川和也氏に感謝いたします。