

アナログ回路設計

1. 目的

近年、電子回路のシミュレーション法が発達し、実用的な回路の設計においてもシミュレーションが本格的に導入されるようになりました。本実験では、SPICE という現在業界標準となっている回路シミュレータを用いて、オペアンプ（演算増幅器、Operational Amplifier）等の能動素子に、抵抗やコンデンサなどの受動素子を付加して構成したアナログ回路についての基礎的な知識を習得します。そのために、いくつかの基本となる回路を設計入力し、その諸特性を測定します。また、シミュレーションを利用して設計した回路を、実際の素子を利用して作成し、解析することで、アナログ回路についての理解を深めます。

アナログ回路のむずかしさは、回路モデルがインピーダンスという虚数世界で記述され、その動作が目に見えにくいことです。従来はまず試作回路を制作し、テスターによる数値測定やオシロスコープでの波形観測から回路の動作を理解しようとしていたら、過電圧で回路が破壊してしまった…ということが学生実験では一般的でした。現在の半導体・電気メーカーの設計現場では、実機の代わりにシミュレータを使ってほしいのあたりをつけ、それから試作回路を製作し動作確認することがよく行われています。

2. 電子回路シミュレーション

2-1 電子回路シミュレーションとは

電子回路シミュレーションとは、設計者が回路構成と素子特性を入力として与え、計算機シミュレーションにより回路の特性を求める処理のことです。この処理は一般に、非線形連立方程式を解析せねばならず、ニュートン法の各ステップごとに繰り返し線形連立方程式を解くことに帰着されます。連立方程式の解法としては回路シミュレーションの場合は数値計算の収束性の問題から、反復法はあまり用いられずに、直接法によって解析解を求めます。1960年代に、この回路解析のプログラム開発の歴史が始まり、以下の方法が検討されました。

状態変数解析法：	ブランチ（回路表現の最小単位）の各端子の電圧，電流を方程式として形成するもの
ネットワークタブロー法：	回路網に関する全ての入力情報をそのまま1つのマトリクスとして方程式をたてる方式
節点解析法：	ノード（信号線）の電圧を未知数として方程式をたてる方式

現在の実用的な電子回路シミュレーションのほとんどが節点解析法を用いています。

2-2 デファクトスタンダード電子回路シミュレータ SPICE

SPICE は、カリフォルニア大学バークレー校(UCB)で開発されたデファクト・スタンダード（事実上の業界標準）の回路解析プログラム Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis の

頭文字をとったものです。UCB の L. W. Nagel と D. O. Pederson の学位論文研究から、1973 年に FORTRAN で開発されたものです。移植性がよく、Spice1、Spice2、Spice2E とバージョンアップされ、1981 年に Spice2G6 がパブリックドメインソフトウェアとしてソースコードを公開されました。このソースコードを手がかりに、各半導体・電気メーカーは、下記の改良を加えた商品版 Spice を発売しました。Spice には以下のような特徴があります。

- ・回路図エディタと一体化
- ・シミュレーション結果のグラフィカル表示機能
- ・実デバイス部品の動作モデルの提供
- ・アナログ・デジタルの混載シミュレーション機能
- ・数値計算の最適化により、高速シミュレーションの実現

現在アナログ電子回路シミュレータと呼ばれているもののほとんどは、この UCB 版の Spice を基本にしており、本学生実験で用いる multiSIM Spice 電子回路シミュレータもその一つです。

参考書：トランジスタ技術 SPECIAL No. 13 「特集シミュレータによる電子回路理論入門」、CQ 出版

トランジスタ技術 SPECIAL No. 56 「電子回路シミュレータ活用マニュアル」、CQ 出版

トランジスタ技術 SPECIAL No. 62 「電子回路シミュレータの本格活用法」、CQ 出版

小野田真徳樹：現代回路理論、昭晃堂

牛田明夫 他：非線形回路の数値解析法、森北出版

無償参考ソフト：電子回路シミュレータのベンダや PLD 素子のベンダ、業界団体などが無償で提供している電子回路分析ツールが、下記の URL の「(9) アナログ回路シミュレータ関連」からダウンロード可能です。自習に利用できます。なお、学生実験で用いている multiSIM ver6 は暗号キーにより不正コピーが行えないようになっていますので、実行ファイルを他のマシンにコピーしても利用できません。

<http://www.cqpub.co.jp/dwm/editors/sn/freeda/freeda.htm>

2-3 電子回路シミュレーションを用いた回路解析

電子回路シミュレータの利用の流れは、

- 1) 回路図エディタを用いて、回路の接続情報と素子のパラメータ情報を入力する
- 2) シミュレーション計算を実行する
- 3) 計算結果を目的の解析に応じて、グラフィカルに表示する。

であるが、PC や WS の計算能力の向上から、multiSIM ver6 のように、2) と 3) とを同時に内部実行し、ユーザにシミュレーション計算の過程を隠蔽することで、操作性を高めているものも多くあります。

電子回路シミュレータで行う分析には、

- ・直流解析： 抵抗と直流電源のみからなる回路（もしキャパシタがあるなら開放、インダクタがあるなら短絡）を解析し、各部の電圧値、電流値を求める。トランジスタ回路のバイアスの設計等に利用。
- ・交流解析： 小振幅の正弦波入力に対して、回路の利得や位相差を解析。
- ・過渡解析： さまざまな入力信号に対する波形の観測を行う。用途は大変広く、波形の歪みから位相差の観測、遅延時間の観測まで、多用される。アナログ電子回路シミュレータの最も基本となる解析機能。
- ・周波数特性解析（またはフーリエ解析）： 正弦波入力に対する回路の利得や位相差を、周波数軸で観測。フィルタ特性や発振器の設計に利用。交流解析の入力周波数をスイープしたものと等価。
- ・パラメータスイープ解析： 回路中のある素子のパラメータを段階的に変化させ、回路の動作の振る舞いの変化を分析する。トランジスタのベース電流を段階変化させた時の、エミッタ・コレクタ間電圧-コレクタ電流特性のカーブを求める等に利用。
- ・周波数解析： さまざまな入力信号に対する波形の観測。

等があります。今回の実験では、「過渡解析」「パラメータスイープ解析」「周波数特性解析」を行います。

3. オペアンプを用いたアナログ回路（実験 A の復習）

3-1 オペアンプの基本動作

オペアンプの応用回路の中の一例として、最も基本的な反転増幅器を図 1 に示す。この回路動作を考える上で、オペアンプが次のような理想特性をもつと仮定すると、その解析が容易になる。すなわち、

- (1) 電圧利得が無限大 ($A_v = \infty$)
- (2) 入力インピーダンスが無限大 ($Z_i = \infty$)
- (3) 出力インピーダンスがゼロ ($Z_o = 0$)
- (4) 周波数帯域が無限大
- (5) オフセット電圧がゼロ
- (6) バイアス電流がゼロ ($I_{b1}=I_{b2}=0$)

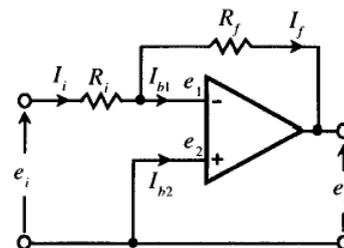


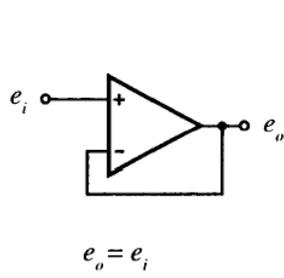
図 1 反転増幅器

上記理想特性から、 $e_1 = e_2 = 0$ 、 $I_{b1} = I_{b2} = 0$ となるので、 $I_i = I_f$ 、 $e_i = R_i I_i$ 、 $e_o = -R_f I_f$ が成り立つ。その結果、反転増幅器の出力は $e_o = -e_i R_f / R_i$ となり、2つの抵抗値を選ぶことによって任意の増幅度 ($-R_f / R_i$) をもつ増幅器を得ることができる。この例が示すように、オペアンプを理想化することによって、種々の応用回路の動作解析が簡単にできる。

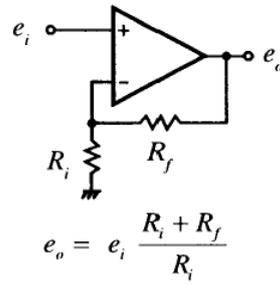
3-2 オペアンプを利用した様々な回路

オペアンプを応用した代表的な回路例を図 2 に示す。これらの回路は単独に用いられたい、あるいは目的に応じて複数の回路を組み合わせられて用いられる。各回路毎に記す計算結果は、前述のよう

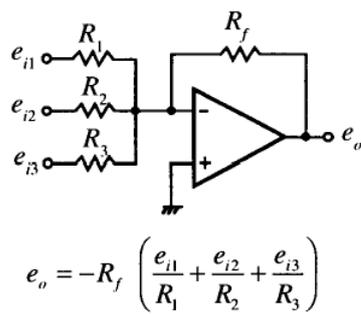
にオペアンプを理想化することによって得られたものである。



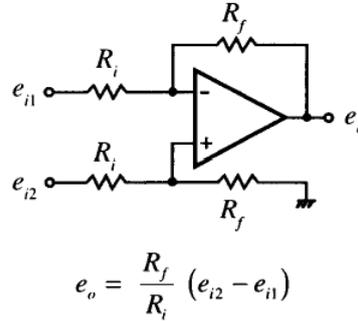
(a) ボルテージフォロワー



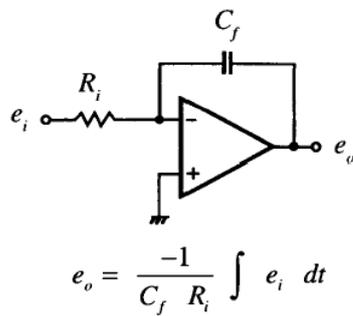
(b) 非反転増幅器



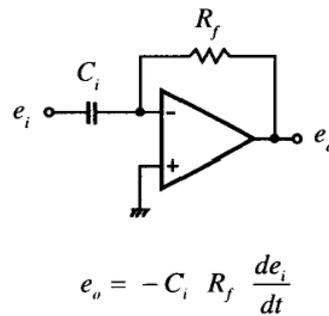
(c) 加算器



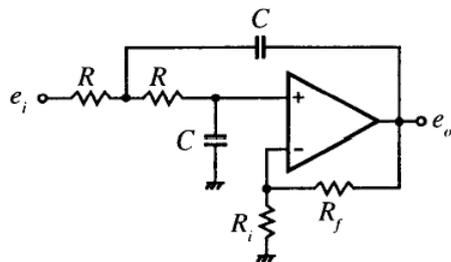
(d) 差動増幅器



(e) 積分器



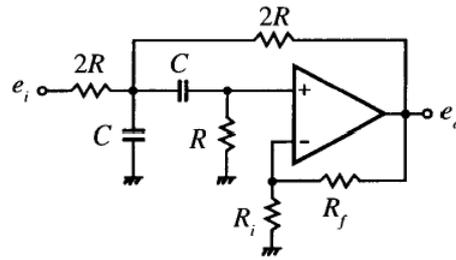
(f) 微分器



$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + j \frac{1}{Q} \frac{f}{f_c}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}, \quad Q = \frac{1}{3-A}, \quad A = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

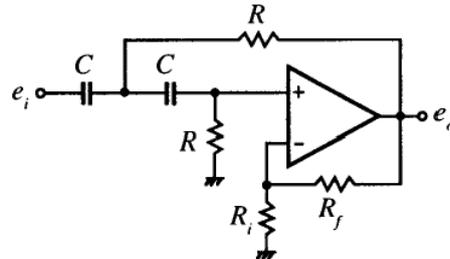
(g) 低域アクティブフィルタ : LPF (Low Pass Filter)



$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Q} + j \left(\frac{f}{f_c} - \frac{f_c}{f} \right)}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}, \quad Q = \frac{2}{6-A}, \quad A = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

(h) 帯域アクティブフィルタ : BPF (Band Pass Filter)



$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{A}{1 - \left(\frac{f_c}{f} \right)^2 - j \frac{1}{Q} \frac{f_c}{f}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}, \quad Q = \frac{1}{3-A}, \quad A = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

(i) 高域アクティブフィルタ : HPF (High Pass Filter)

図2 オペアンプの応用回路

4. 実験

以下の実験課題を順に行ってください。

練習課題. multiSIM の使い方を学習する (この結果はレポートに記載する必要はありません)

- I PC へのログイン・ログアウトの方法
- II multiSIM の立上・終了方法
- III 別冊子「multiSIM を使ったアナログ回路設計方法・練習課題」に沿って、multiSIM の使い方を学習してください。

課題 1. オペアンプを使った演算回路

- I 反転増幅回路
- II 加算回路
- III ブレッドボードに加算回路を組んでみる

課題 2. フィルタ回路

- I 低域アクティブ フィルタ
- II ブレッドボードに低域アクティブフィルタ回路を組んでみる
- III 高域アクティブ フィルタ

課題 3. 発振回路

- I ウィーンブリッジ正弦波発振回路
- II ブレッドボードにウィーンブリッジ正弦波発振回路を組んでみる

課題 4. 自分で回路を設計し、組んでみる

課題 1. オペアンプを使った演算回路

I 反転増幅回路

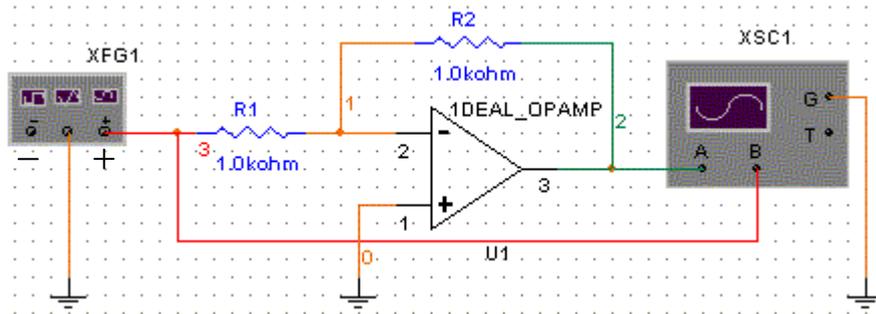


図 3 反転増幅回路

(1) 回路の作成

- ・ グラウンド 3 つ、 $1k\Omega$ の抵抗 2 つ、ファンクション ジェネレータ、オシロスコープ、理想オペアンプ (図 4 : 1DEAL_OPAMP) を作業領域に配置します。同じものが 2 つ以上ある場合は、「In Use List」を活用することができます。
- ・ オペアンプは、横軸に対して反転します。オペアンプを選択し、右マウスボタンをクリックします。プルダウンメニューから [Flip Vertical] を選択します。
- ・ コンポーネントを配線し、それぞれ配線をわかりやすい色に変更します。

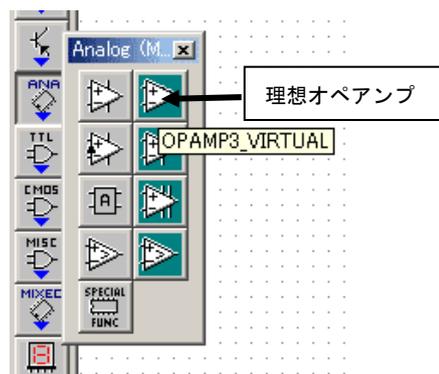


図 4 理想オペアンプの選択

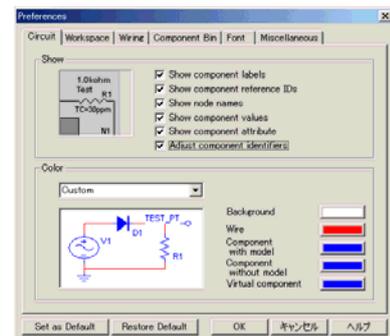


図 5 表示の設定

(2) 表示の設定

- ・ メニュー [Options] → [Preferences] を選択します (バージョンによって多少異なる)。図 5 のようなダイアログ ボックスが表示されます。
- ・ Display 欄すべてのチェックを入れます。
- ・ [OK] ボタンを押して、設定を有効にします。

(3) ファンクション ジェネレータの設定

- ・ ファンクション ジェネレータのアイコン  をダブルクリックして、拡大表示させる (図 6)。
- ・ 正弦波を選択し、Frequency を 10kHz、Amplitude を 5V に設定します。

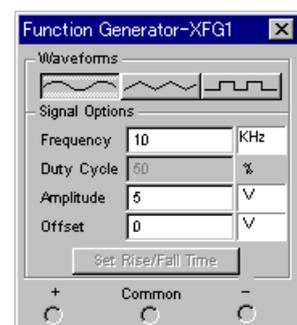
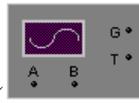
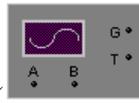


図 6 ファンクション ジェネレータ

(4) 回路をアクティブにする



- ・ オシロスコープ アイコン  をダブル クリックして拡大表示します。
- ・ 設定は図7のようになっていることを確認してください。

— ヒント —

ファンクション ジェネレータで Frequency(振幅)を 10kHz に設定したので、1 波長が $100\mu\text{s}$ になります。そこで、オシロスコープの Time base を $10\mu\text{s}/\text{div}$ (時間/1目盛)以上に設定しなければ見にくくなります。逆に、大きすぎても同様のことが言えます。

- ・ Simulate  アイコンを左クリックして表示されるメニューから Run/Stop を選択して回路をアクティブにします。
- ・ 図8のように、入力波に対して出力波が反転したことを確認してください。



図7 オシロスコープの設定

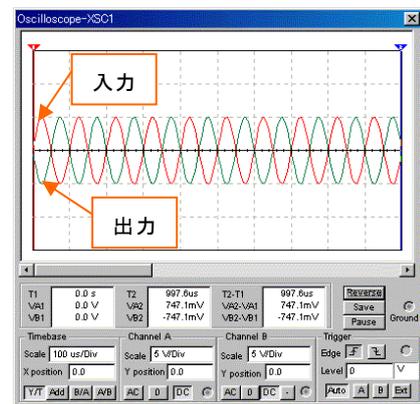


図8 入出力波形

(5) 反転増幅器の増幅率を変えてみる

- ・ 次に、抵抗 R2 の大きさを変えることによって反転増幅器の増幅率がどのように変化するかをシミュレーションを通して確認します。



- ・ Analysis アイコン  を左クリックして表示されるメニューから **Transient Analysis** を選択します。Transient Analysis のダイアログ ボックスが表示されます。
- ・ Analysis Parameters タブの設定は図9のようにしてください。

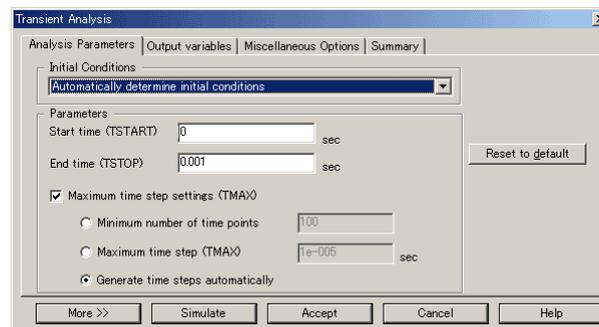


図9 Analysis Parameters の画面

- ・ Output variables タブを選択してください。図10のように設定してください。

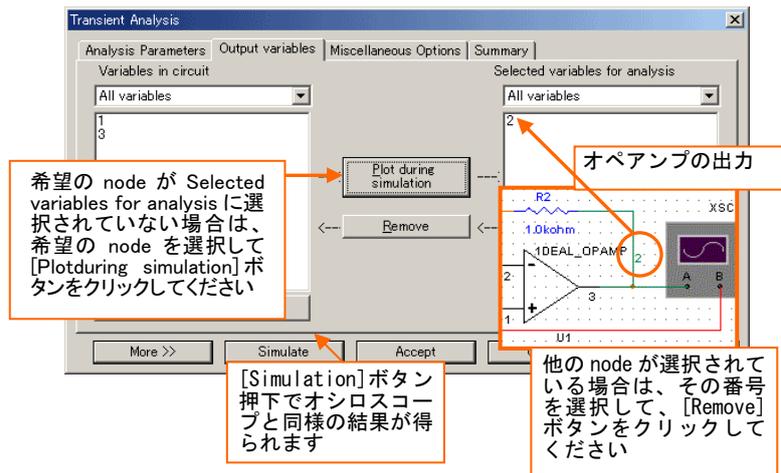


図 10 Output variables の画面

- **[Accept]** ボタンをクリックして設定を有効にします。
- Analysis アイコン  を左クリックして表示されるメニューから Parameter Sweep を選択します。Parameter Sweep のダイアログボックスが表示されます。
- Sweep Parameters の項目から
 - Sweep Parameter のプルダウン・メニューから **Device Parameter** を選択します。
 - Device Type のプルダウン・メニューから **Resistor** を選択します。
 - Name のプルダウン・メニューから **rr2** を選択します (rr2 は抵抗 R2 のことを指しています。番号は Sheet に配置した順番です)。
 - Parameter のプルダウン・メニューから **resistance** を選択します。
- Points to sweep の項目から
 - Sweep Variation Type のプルダウン・メニューから **Linear** を選択します。
 - Start を **800Ω** に、End を **1200Ω** に設定します。
 - Increment を **200** に設定します (200 刻み)。

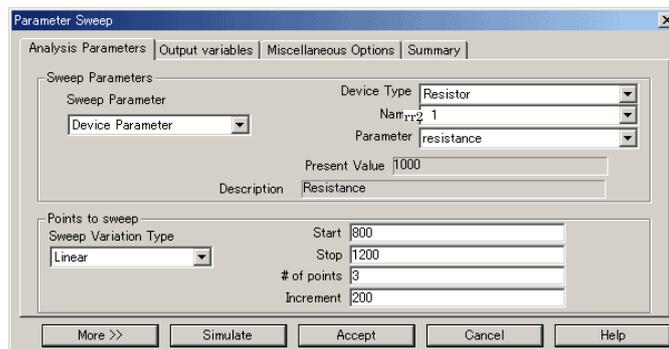


図 11 Parameter Sweep のダイアログ ボックス

- **[More]** ボタンを押します。
- 「More Options」の中にある「Analysis to sweep プルダウン・メニュー」から **Transient Analysis** を選択します。
- **[Edit Analysis]** ボタンをクリックします。「Sweep of Transient Analysis…ダイアログ」が表示されます。End time を 0.0005s ($500\mu\text{s}$) に設定してください。1 波長が $100\mu\text{s}$ なので 5

つ波が表示されます。

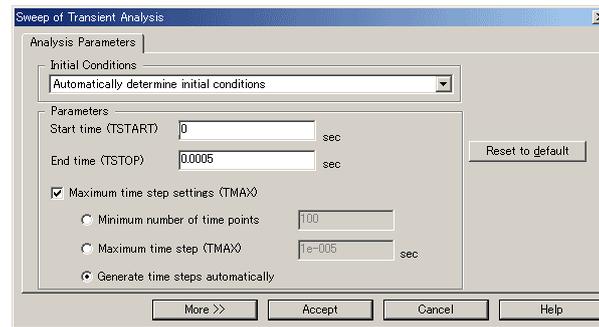


図 1 2 Sweep of Transient Analysis…ダイアログ

- ・ [Accept] ボタンをクリックして設定を有効にします
- ・ Parameter Sweep…ダイアログで **Output variables** タブを選択します。図 1 3 のような設定にします。
- ・ ダイアログ ボックス右下の [Simulate] ボタンをクリックします。
- ・ 図 1 4 のような波形が表示されます。

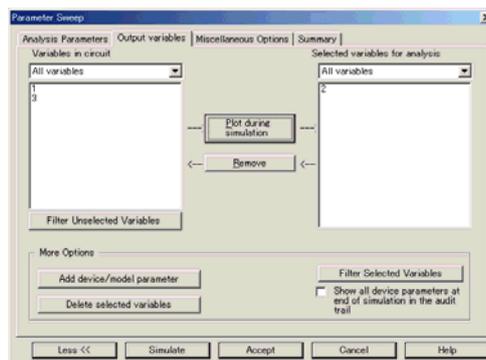


図 1 3 Parameter Sweep…ダイアログ

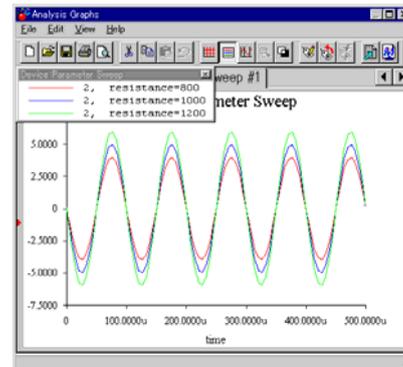


図 1 4 Parameter Sweep 出力結果

(6) 結果の検証

抵抗 R2 の大きさを 800 Ω、1000 Ω、1200 Ω と変更した場合について、図 1 から導き出される増幅率とシミュレーション結果を比較し一致しているか検証してください。

II 加算回路

(1) 回路の作成とシミュレーション

I で作成した回路に Clock を組み込んで、周波数の異なる正弦波と方形波を加算する回路を作成します。

- ・ 図 1 5 のように抵抗と Clock を I で作成した回路に接続します。

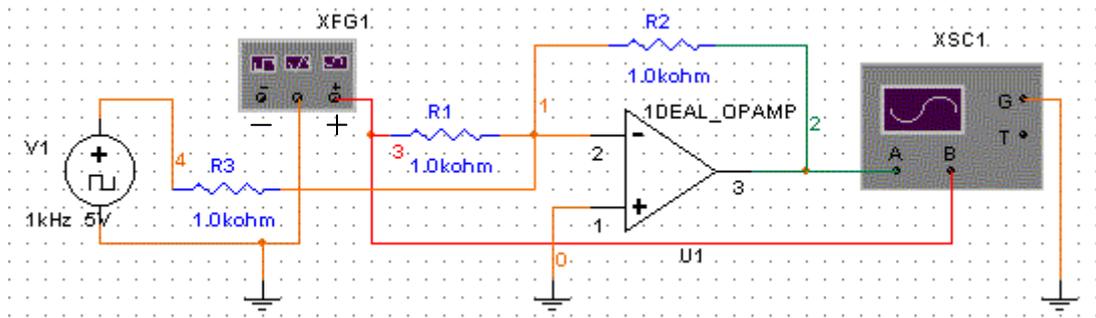


図 15 加算回路

- Clock アイコンをダブル クリックして Clock Properties を開きます。
- Value タブを選択します。Frequency (振幅): の値を 1kHz に設定します。
- オシロスコープを拡大表示させて、回路をアクティブにします。
- 波形が見にくい場合は、オシロスコープの Time base 欄のスケールを変えてみてください (s/Div 横の矢印を上下させて変えます)。

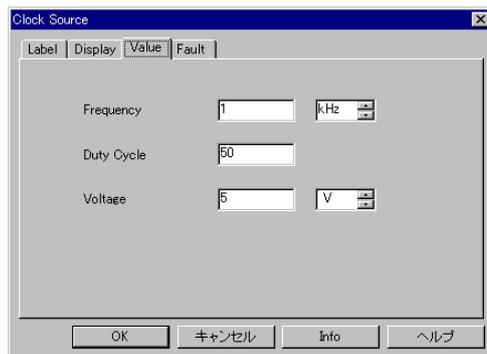


図 16 Clock Properties の画面

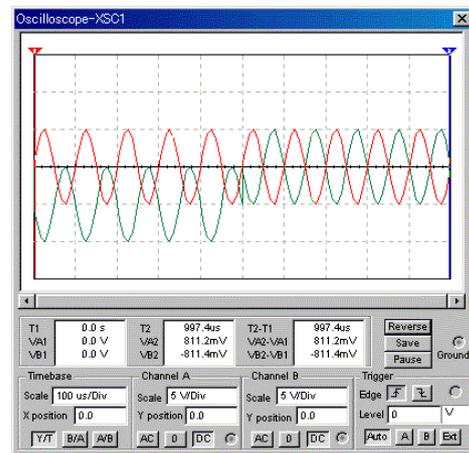


図 17 出力結果

－ ヒント －

ファンクション ジェネレータで Frequency (振幅) を 10kHz に設定したので、1 波長が $100 \mu\text{s/Div}$ になります。Clock の設定を 1kHz にすると、1 波長が 1ms/Div になります。そこで、オシロスコープの Time base を $100 \mu\text{s/Div}$ にすると、加算された波形が一画面に表示できます。また、メニューから Simulate/Default Instrument Setting... のダイアログで利用しやすい設定に変更してください。

－ ヒント －

“タイム ステップが小さすぎる” と警告文が出る場合は、警告されている値よりも大きい値に設定してください ($1.35734\text{e-}010$ よりも大きい値、例えば $1.0\text{e-}09$)。また、Default Instrument Setting... の設定で Maximum time step (TMAX) のラジオボタンをチェックする場合は、値が大きいとききれいな波形が表示されないために識別するのが困難なことがあります (逆に小さすぎると処理に時間がかかります)。

Ⅲ ブレッドボードに加算回路を組んでみる

(1) ブレッドボードの使い方

基板であっても、一度半田付けしてしまった部品を、はずしたり付けたりすることは、作業が大変で時間もかかります。そこで、電子回路を試作する場合には、プリント基板に組む前に、大方はブレッドボード（図17）を使います。ブレッドボードは電子回路のアイデアを即、組み立てられる半田付け不要ボードです。

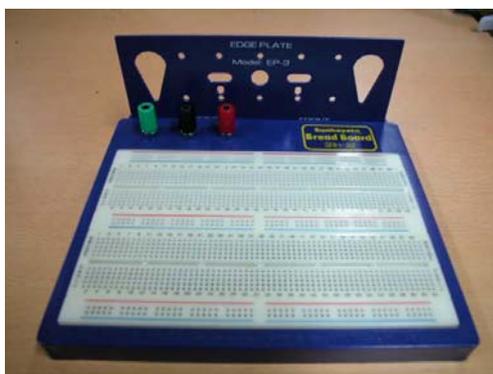


図17 ブレッドボードの外観

ブレッドボードの構成ブロックは、大きく分けて部品配線用と電源配線用があります。図18で＋と記載されたブロックが電源配線用ブロック、abcdefghijと記載されたブロックが部品配線ブロックです。電源配線ブロックでは、赤い[+]のラインに沿った穴同士、青い[-]のラインに沿った穴同士が、それぞれ中でつながっています。部品配線ブロックでは、図18中[a b c d e]のラインに沿った穴同士、[f g h i j]のラインに沿った穴同士が、それぞれ中でつながっています。つながっている箇所を方向を、図の矢印で示します。

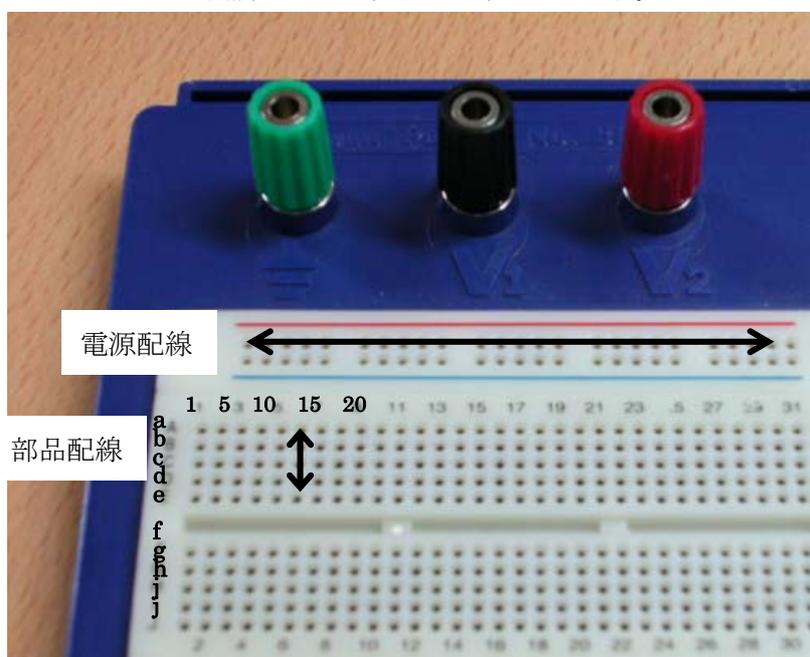


図18 ブレッドボードの構成ブロック

(2) 回路を組む

各電源配線ブロックの[-]を接続ケーブルでつなぎ合わせ、GNDとして全体を接続しておきます。次に、実験室の棚からオペアンプ、抵抗、コンデンサなどの素子を選択し、ブレッドボード

に並べます。オペアンプの足は、図 19 のような構成になっています。図 20 は、ブレッドボードに部品を挿した一例です。穴の間隔は、2.54 mm ですので、大半の部品の端子幅に合わせて作られています。次に、素子と電源や離れた素子同士は、ジャンプワイヤーを使って接続します（図 21）。

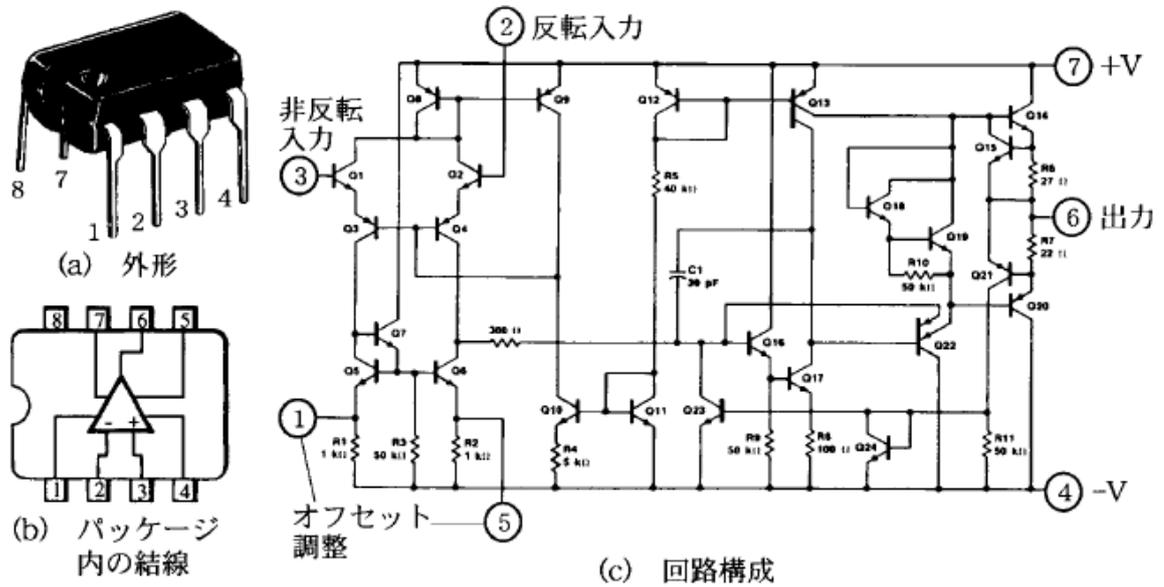


図 19 オペアンプ (LM741) の外形と回路構成

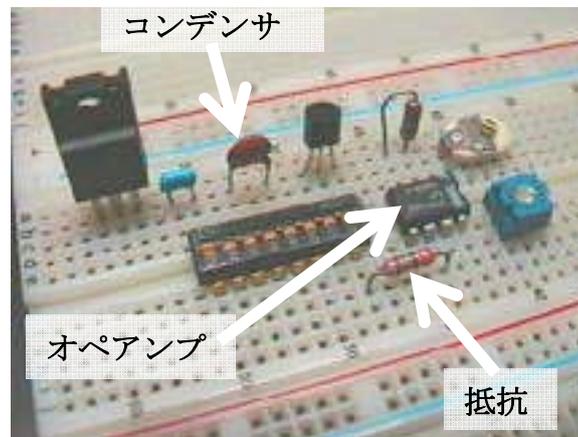
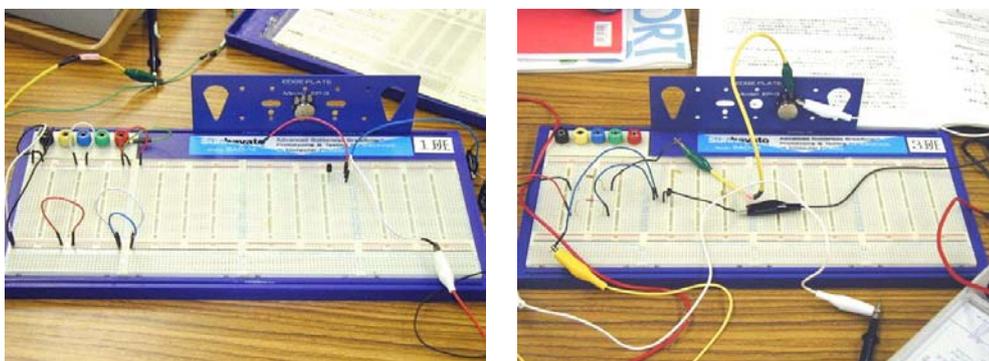


図 20 ブレッドボードに素子を挿している様子



(a) 良い例

(b) 悪い例

図 21 ケーブルの使い方

回路が完成したら、

- ・ 直流電源と電源配線ブロックとを接続します。
- ・ 2台のファンクションジェネレータをそれぞれ正弦波と方形波に設定し、IIで設定した周波数に設定する。ファンクションジェネレータの出力を、ブレッドボードで作成した回路と接続する。ファンクションジェネレータのアースは、電源配線部の青いラインとつなぐ。
- ・ オシロスコープの入力を、ブレッドボードで作成した回路と接続する。オシロスコープのアースは、電源配線部の青いラインとつなぐ。

(3) 波形の観察・結果の検証

- ・ オシロスコープで入出力信号を観察、グラフ用紙に写す。
- ・ IIのシミュレーションより得られた出力結果とオシロスコープで観察した出力結果を比較し、その誤差を検討する。

課題2. フィルタ回路

I 低域アクティブ フィルタ

(1) 回路の作成

- ・ 図22のように回路を作成してください。

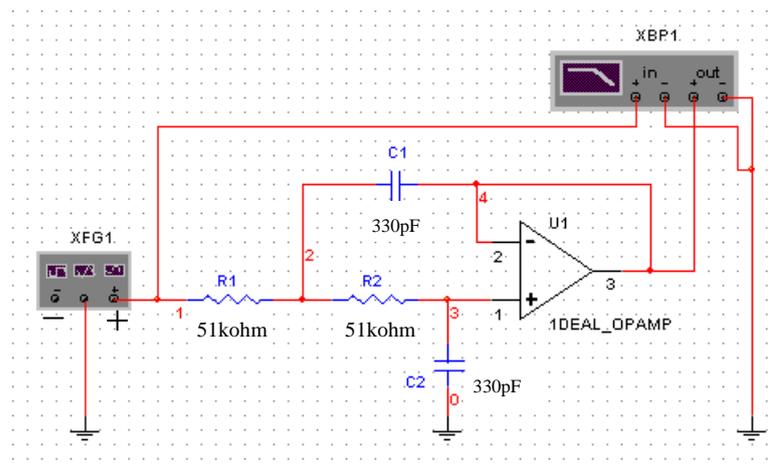


図22 低域アクティブフィルタ回路

(2) 回路をアクティブにする(ボーデプロッタを使って、波形を観る)

- ・ ボーデプロッタの設定を図23のように変えます。

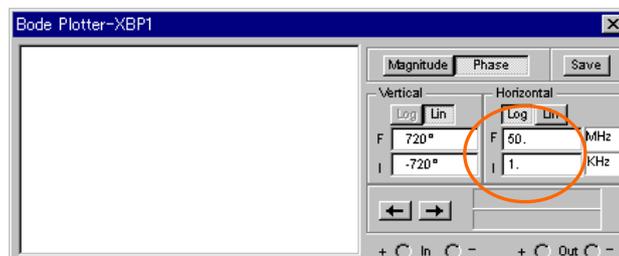


図23 ボーデプロッタの画面

- ・ 回路をアクティブにします。
- ・ 図24のように入力電圧と出力電圧の比を周波数の関数がプロットされます。

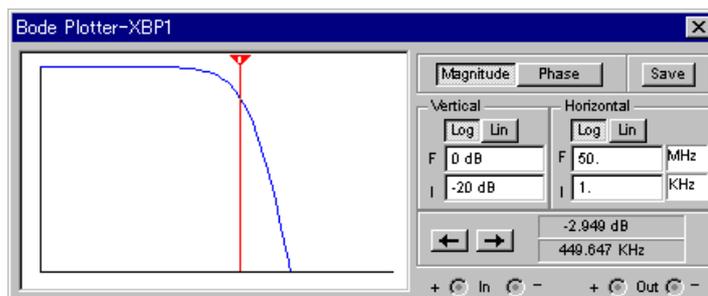


図 2 4 周波数特性のグラフ

- [Phase]ボタンを押すと図 2 5 のような位相の変化が観察できます。

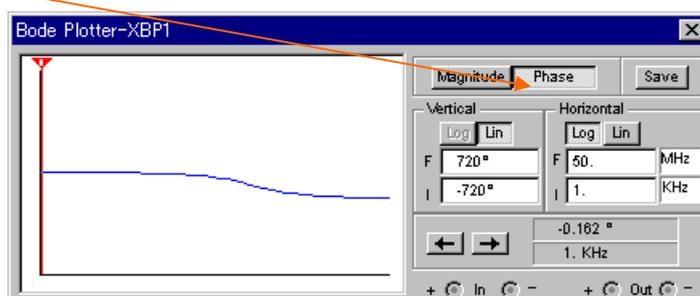


図 2 5 ボーデプロッタの画面

(3) AC Analysis を使ってボーデプロッタと同じ波形を観る

- メニュー[Simulate]→[Analyses]→[AC Analysis...]を選択します。図 2 6 のようなダイアログボックスが表示されます。Frequency Parameters タブをクリックして次のように設定してください。

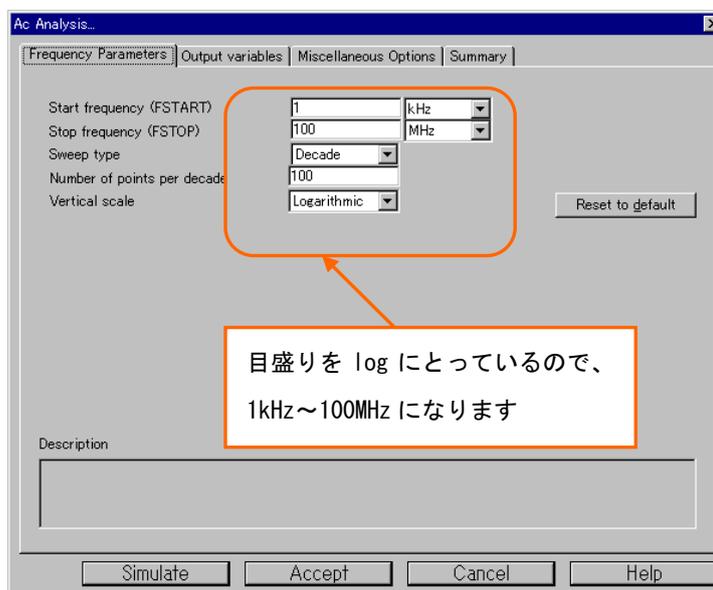


図 2 6 AC Analysis の画面

- Output variables タブを選択します。オペアンプの出力にあたる node 番号を選択(ハイライト表示)させて[Plot during simulation]ボタンを押します。表示させたい node 番号のみが Selected variable for analysis 欄に表記されていることを確認してください。他の node1 番号が表記されている場合は、[Remove]ボタンを押して選択からはずしてください。(図 2 7)

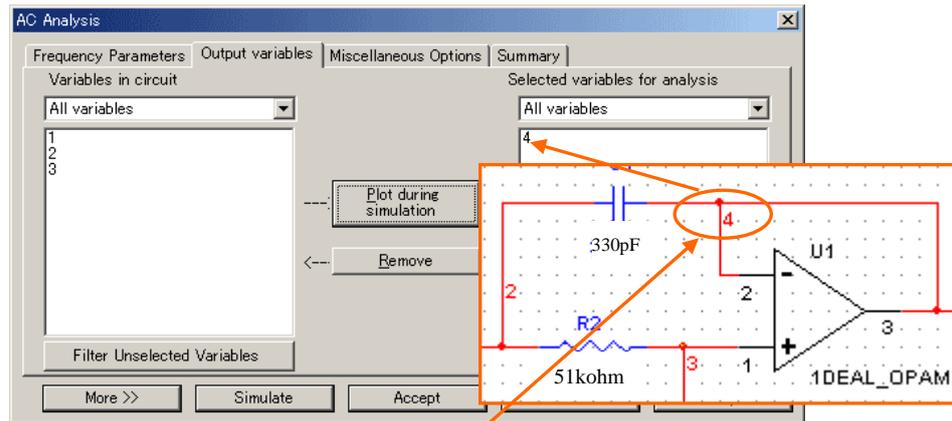


図 2 7 Output variables の画面

- Node for analysis 欄に選択する数がわからない場合は、Sheet (作業領域) 上の何も無い場所で右クリックして表示されるメニューから Show を選択してください。図 2 8 のようなダイアログが表示されます。Show node name にチェックを入れてください。オペアンプの出力先の node 番号を選択してください。

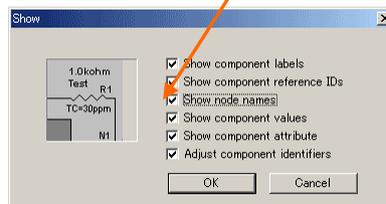


図 2 8 node 番号の表示

- [Simulate] ボタンを選択すると、図 2 9 のようなグラフが表示されます。

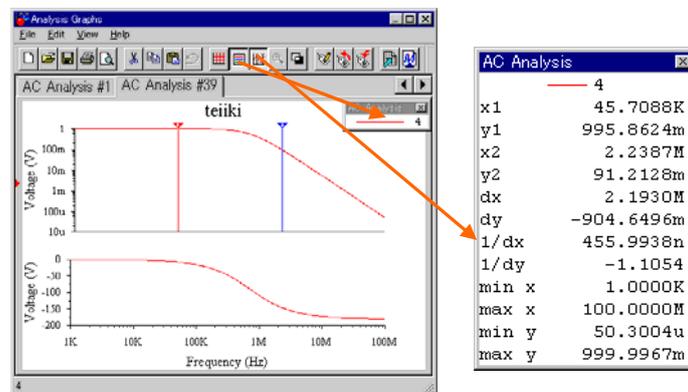


図 2 9 AC Analysys の結果

- ツールバーの  アイコンをクリックすることで現在プロットしている node 番号が、 アイコンをクリックすることで 2 本の縦線カーソルがグラフ上に表示されます。2 本のカーソル間の関係は別ウィンドウに表示されます。
- 結果のグラフは縦線カーソルを使って遮断周波数 (f_c : 利得が $1/\sqrt{2}$ となる周波数) を測定し、その様子を印刷しましょう。

(4) 結果の検証

回路図から導き出される遮断周波数と実験結果を比較し一致しているか検証してください。

II ブレッドボードに低域アクティブフィルタを組んでみる

(1) 回路を組み立てる

課題 1 の要領で、ブレッドボードに I で設計した低域アクティブフィルタを組み立ててください。

(2) 周波数特性の観測

ファンクションジェネレータの周波数を 10Hz から 1MHz まで変化させ、組み立てた低域アクティブフィルタの周波数特性をグラフ用紙に書き取ってください。

(3) 結果の検証

multiSIM を使った周波数特性のシミュレーション結果と実際に組み立てた回路の結果を比較し、誤差の検討を行ってください。

III 高域アクティブフィルタ

(1) 回路を作成する

- ・ 図 3 0 のように回路を作成してください。

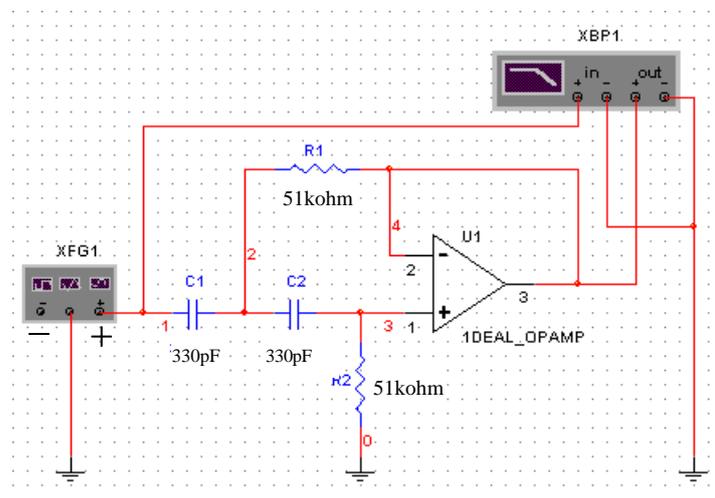


図 3 0 高域アクティブフィルタ

(2) 波形の観測

I 低域アクティブフィルタのときと同じ設定にしてください。

- ・ 回路をアクティブにし、ボーデプロッタで波形を観ましょう。(図 3 1)

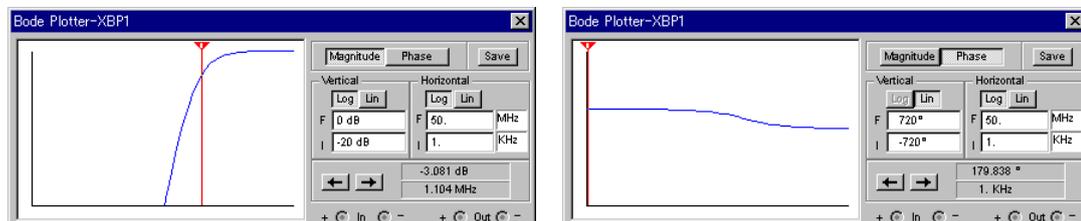


図 3 1 周波数特性の出力結果

- ・ AC Analysis を使って、グラフを表示します。
- ・ 結果のグラフは縦線カーソルを使って遮断周波数 (f_c : 利得が $1/\sqrt{2}$ となる周波数) を測定し、その様子を印刷しましょう。

(3) 結果の検証

図 2 (i) から導き出される遮断周波数と実験結果を比較し、一致しているか検証してください。

課題 3. 発振回路

I ウィーンブリッジ

(1) ウィーンブリッジの原理

フィードバックを原理とする正弦波発振回路の動作を、multiSIM を用いて習得します。

図 3 2 は、ウィーンブリッジ型と呼ばれる正弦波発振回路の具体的回路設計の例である。この回路を multiSIM に入力し、次の実験を行なってください。

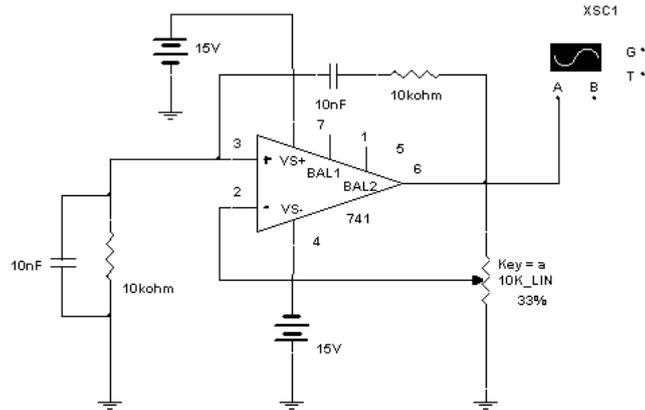


図 3 2 ウィーンブリッジ回路

(2) 発振点の測定

半固定抵抗の配分比を 50% から徐々に減少させて、発振が始まる点を探して、その配分比を記録してください。さらに、その点から半固定抵抗を逆に増加させて発振が停止することも確認してください。ただし、回路中にある可変抵抗の設定は、素子をクリックし選択状態にした後、“a”キーと“A”キーで配分比をアップダウンさせることができます。

(3) 発振周波数の測定

発振周波数を測定してください。そのときの波形を印刷してください。

(4) 結果の検証

次ページの図 3 3 はウィーンブリッジ型発振回路の基本構造を示したのですが、点線で囲んだ部分は、 v_1 を入力とし、 v_0 を出力とする正相増幅器（非反転型増幅器）になっています。その増幅率を求めてください。次に、 v_0 を v_1 にフィードバックして発振させる訳ですが、正相増幅器のためその位相差がゼロになる必要があります。 v_1 すなわち v_F は、CR 直列回路と CR 並列回路で分圧されたものです。 v_0 と v_F の位相差がゼロになる周波数を導出してください。 v_F は v_0 を分圧したものですか

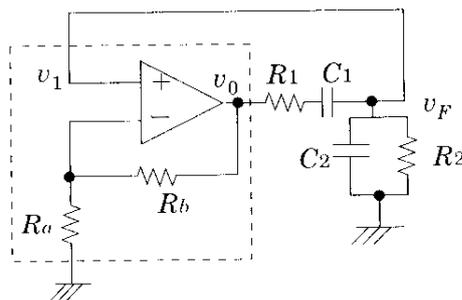


図 3 3 ウィーンブリッジ型発振回路の構造

ら、 v_0 に比べて振幅は小さくなります。よって、発振が継続するためには、正相増幅器の増幅率がある条件になければなりません。それを算出してください。最後に、これらの結果が、(1)、(2)の実験で得られた値と一致しているかを検証してください。

Ⅱ ブレッドボードにウィーンブリッジ発振回路を組んでみる

(1) 回路を組み立てる

課題1の要領で、ブレッドボードにIで設計したウィーンブリッジ発振回路を組み立ててください。

(2) 発振周波数の観測

オシロスコープで波形を観測し、グラフ用紙に写す。観測した発振周波数と理論値を比較し、誤差について検討する。

(3) 結果の検証

multiSIMを使った周波数特性のシミュレーション結果と実際に組み立てた回路の結果を比較し、誤差の検討を行ってください。

課題4. 自分で回路を設計し、組んでみる

- ・時間があれば、課題1～3を組み合わせたたり、図2の回路を参考にしたりして、自分で回路を設計し、組み立ててみてください。

例1. 微分回路を組んでみる

例2. 周波数の異なる正弦波を加算回路で合成し、フィルタ回路で1つの正弦波だけを抽出する回路を設計してみる

参考書：学生実験A指導書「アナログ回路」

岡村旭夫：OP アンプ回路の設計、CQ 出版社

佐野敏一，高木宣昭，竹内守：アナログ回路(I)、オーム社

藤井信生：アナログ電子回路、昭晃堂