

1 生体電気用アンプの製作

電気生理学において生体からの電氣的現象を記録し解析するには、増幅その他の信号処理技術が必須となる。生体現象の電氣的測定は、生体内部に発生する電氣的あるいはその他の物理・化学的变化を電極、あるいはトランスジューサで電気現象に変換したのち、それをさらに増幅し、データ処理を行い記録・表示するものである。生体現象は、その信号レベルが比較的低いため測定には十分な注意が必要であり、そのためにも十分な電気回路の基礎知識の理解が要求される。

電気生理実験によく使用されている回路としてパッチクランプアンプがある。図 1 は、今日のように多くのパッチクランプアンプが市販されるまで、研究室で自作し実際に実験で使用されていたホールセル・クランプアンプ(Whole-cell Clamp amplifier)の回路図である。本来はこのアンプの作製を行うのが実用的であるが、作製や調整時間の制約から今回は簡易的な生体電気用アンプの製作を行うことにした。この回路には、図 1 で使われている回路が多く含まれているので、OP アンプ回路の実習を行うのには最適である。

この項では、オペアンプを利用した生体電気用アンプを実際に製作し、電子回路の理解をさらに深めていただく。今回製作する生体電気用アンプは、体表から導出できる心電を測定対象にしている。心電測定は、心臓の活動によって発生する微弱なパルス状の生体電気を人体に取り付けた電極で検出し、増幅してその変化を測定するものである。増幅器は差動増幅器を用い、人体に誘起される種々のノイズを分離するためのフィルタ回路も必需となる。製作後は、実際に製作した生体電気用アンプを用いて自分の心電を測定していただく。なお本来、生体信号などの測定には危険を伴うためアイソレーションなどを施し、十分な注意が必要だが、今回は簡易アンプとして省略してあるので、生体に電極を取り付けて使用する場合は、取り扱いに十分注意して行っていただく。

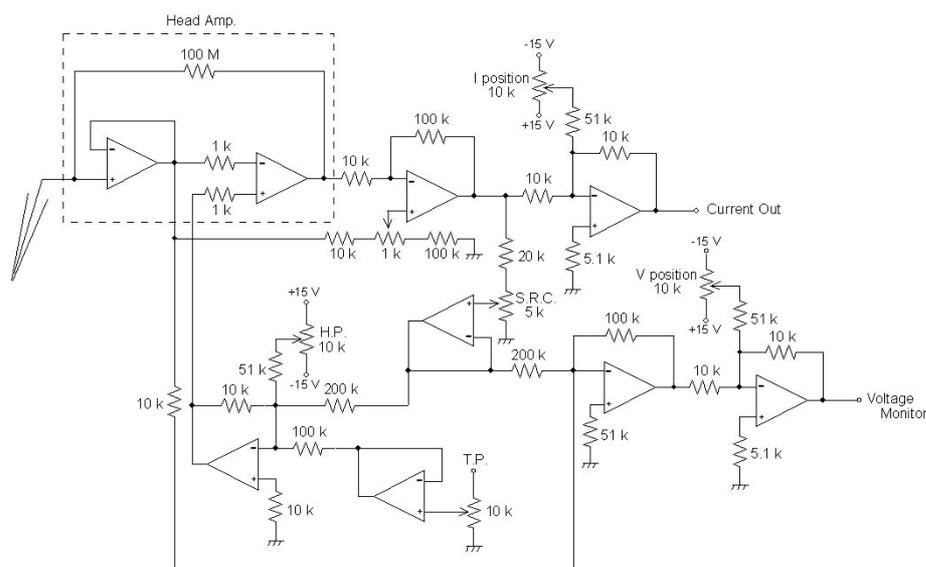


図 1 回路図

1-1 OPアンプとは

オペアンプ（演算増幅器：operational amplifier）とは、アナログ・コンピュータの演算増幅素子として発達してきたもので、2つの入力端子と1つの出力端子をもつ高性能な増幅器である。設計が容易であり、非常に演算誤差が少ないため手軽に高精度な演算が可能である。オペアンプの記号は、図2のように三角形が一般に用いられる。また、電源は普通正負の2電源が使用されるが、デジタル回路などとの相性がよいように1電源で動作するタイプもある。

次にオペアンプの動作を理解する上で大切な考え方であるイマジナリショートとネガティブフィードバックについて説明する。

イマジナリショート

OPアンプは実質的に無限大に近い増幅度をもった差動増幅器であり、その入・出力電圧が能動範囲内で正常に動作しているときは、+・-両入力ピン間の電圧差は無限小、つまりゼロになるという考え方である。この考え方は、OPアンプの+・-両入力ピン間が常に同電位である（見かけ上ショートされている）として解析できるので便利である。

ネガティブフィードバック

これは増幅器の出力電圧を、入力電圧を打ち消す方向に加える（帰還：フィードバック）回路技術である。即ち図3において入力電圧 E_i は R_1 経由で、そして出力電圧 E_o は R_2 経由で、それぞれ - 入力に接続される。このとき出力電圧は入力電圧と位相(極性)が反対となり、 E_i と E_o は互いに打ち消し合う形で - 入力に加えられることになる。これがネガティブフィードバックの考え方である。したがってイマジナリショートの考え方と合わせ図中の式が成立する。

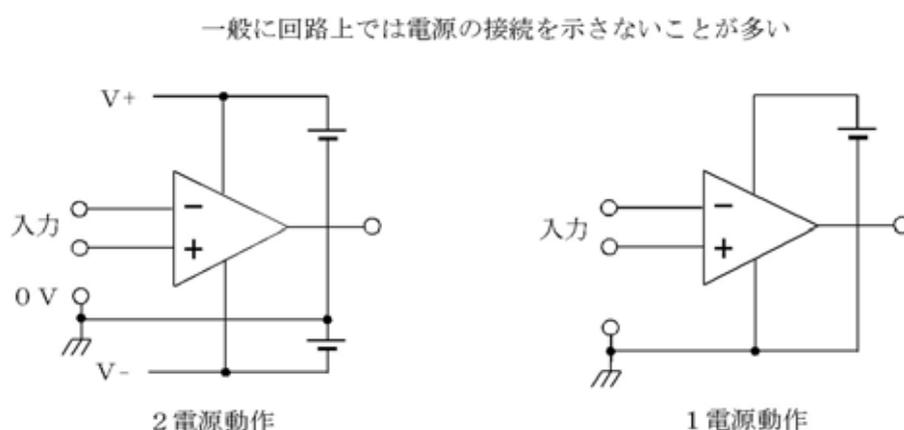


図2

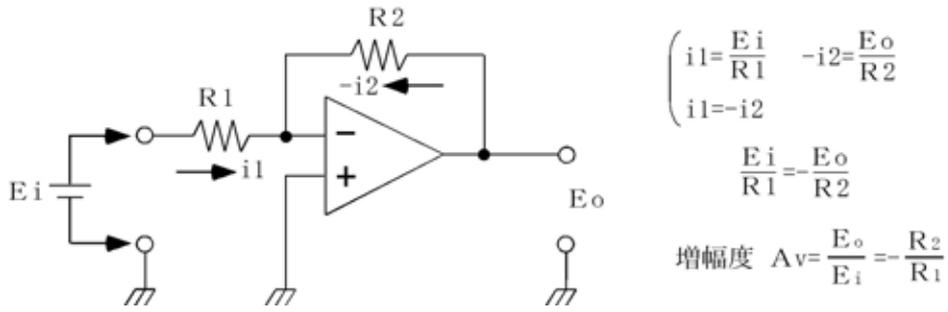


図 3

1-2 回路構成

今回製作するアンプの回路図を図 4 に示す。回路構成は、電極から数 mV の生体電気信号を差動増幅回路で取り込み、そしてゲイン 10 倍の非反転増幅回路、さらにハム除去のためのローパスフィルタ回路 (50 Hz) を通し、ゲインを 100 倍まで可変できる非反転増幅回路から出力を得る。それぞれの増幅段の結合には CR 結合を用いて時定数を 1.5 秒以上としている。さらに心拍をインジケートする回路として半波整流回路、コンパレータ回路も組み込んでいる。

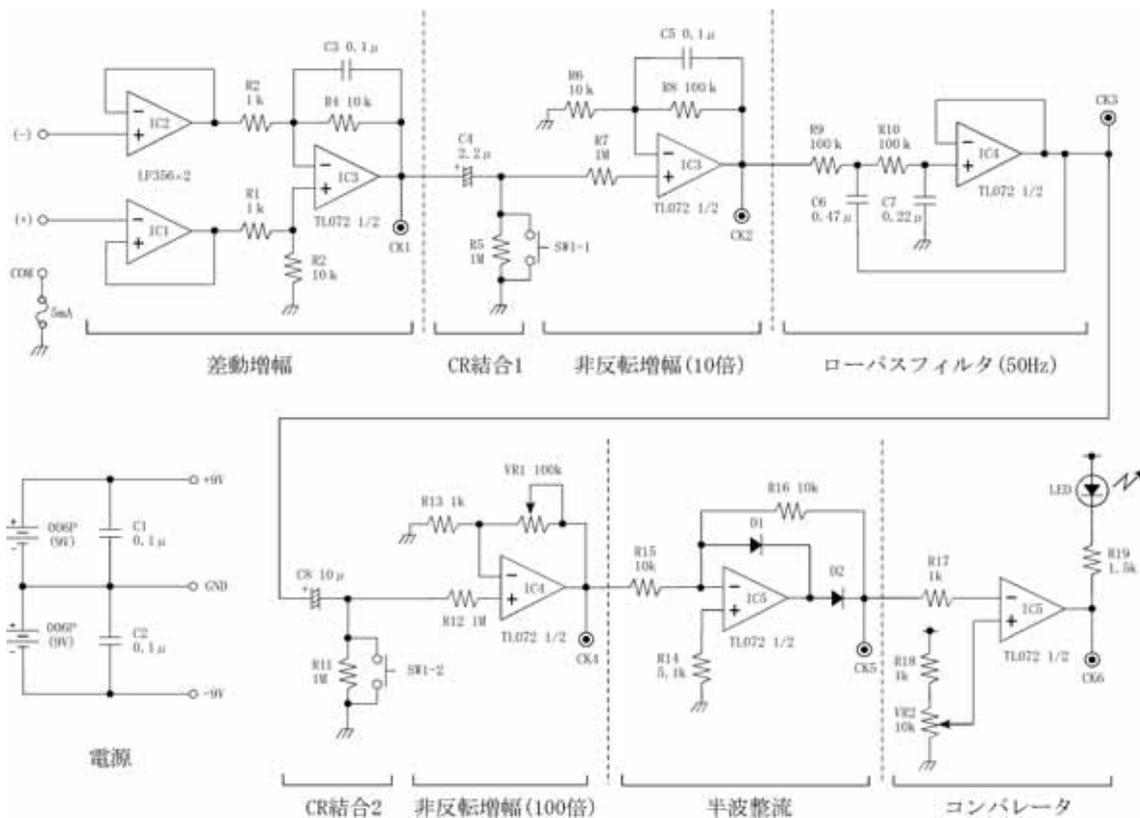


図 4 生体電気用アンプ回路図

1-3 部品の実装

回路の製作工程は各項目ごとに説明を分けている。それぞれの実体配線図を参考にして順番に部品の取り付けを行う。そして各配線が終わったら回路ごとにオシロスコープなどの測定器を使用して動作チェックを行う。

製作手順1 ソケットの取り付け・電源ラインの接続

実装手順：

1-4 実体配線図・使用する部品の手順1の項目を参照し、正しい位置に部品を挿入し、はんだ付けを行う。まずICソケットのような大きめの部品をプリント基板に取り付け、スズメッキ線で電源ラインの接続を行う。そしてソケットに挿入するOPアンプの電源ピンを確認し、ラインとの接続を行う。

動作確認：

テスターでICソケットの電源ピンの導通を調べる。

製作手順2 差動増幅回路部の製作

説明：ボルテージホロワ

ボルテージホロワとは、増幅度 = 1 の非反転増幅回路のことである。OPアンプは、入力抵抗が大きく（入力電流が流れない）、出力抵抗が小さい（出力電流をたくさん流せる）という特性をもっている。そこで回路抵抗の大きな回路から、その回路に影響を与えないように各部分の電圧を取り出し、それを他の回路に供給するバッファアンプ（緩衝増幅器）の用途として使われる。差動増幅回路部のIC1とIC2がボルテージホロワである。今回は、FET入力のLF356を使用している。

説明：差動増幅回路

差動増幅回路は、 $+ \cdot -$ 2本の入力ピン相互間の電位差を増幅して出力するので、両入力にまったく等しい電圧が加えられた場合、入力の電位差はゼロ、したがって出力もゼロになるのが特徴である。この性質を利用して、基準電位に対して一定の電位を持った2点間の電位差などを測定するときに用いられる回路である。ブリッジ式のセンサ出力やシャント抵抗の電圧降下など、接地(グラウンド)に対して電位(同相成分)をもつ信号を増幅するのに差動増幅器はよく使われる。

図5において入力電圧 E_{i2} をゼロとすると、これは R_1 と R_2 の値で増幅度が決まる反転増幅回路になる。このとき R_3 と R_4 は入力バイアス電流が流れているので、入力オフセット電圧に多少の影響を与えるが、その影響は無視できる。次に入力電圧 E_{i1} をゼロとすると、 E_{i2} を R_3 と R_4 で分圧した+入力電圧を R_1 と R_2 の値で定まる増幅度を持った非反転増幅器で増幅するのと等価になる。したがって、この両方の場合を重ね合わせたものが出

力電圧となる。IC3 のように差動増幅器の入力に IC1 と IC2 の 2 つのフォロワを追加すれば入力抵抗は非常に高くなる。

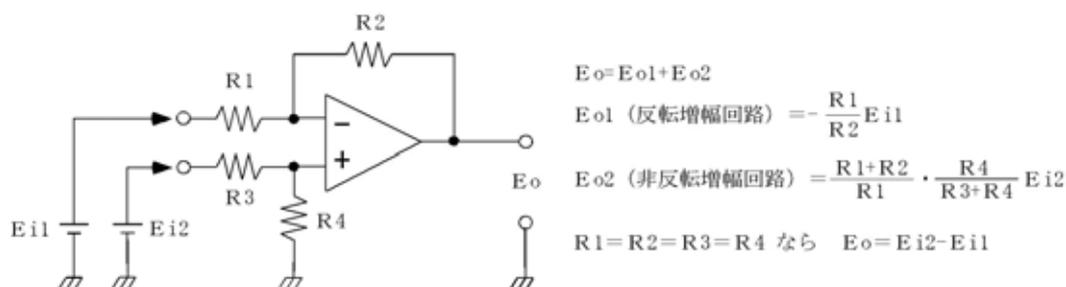


図5 差動増幅回路

実装手順：

1-4 手順 2 の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。IC1 と IC2 の LF356 は OP アンプが 1 回路のシングル型であり、IC3 の TL072 は OP アンプを 2 個内蔵するデュアル型なので注意する。

動作確認：

まず IC1・IC2・IC3 を取り付け、こちらで用意したコネクタに基板を接続する。電源を入れ、電圧調整用の可変抵抗器を調整して差動の両入力に任意の電圧を入れる。両入力の差電圧が出力されているか出力（チェックピン 1）をオシロスコープで確認する。なお、動作確認後は IC をすべて取り外すこと。

製作手順 3 CR 結合 1・非反転増幅回路（GAIN：10 倍）部の製作

説明：CR 結合

心電図のように生体現象を波形として観測する場合、出力振幅に関する周波数特性のほか位相の低域特性が重要な問題となる。低域の位相が、ほかより進みすぎていると心電図のように棘波と徐波が連なっている場合には、ST-T や T 波に大きなひずみを生じて測定に支障をきたしてしまふ。そこで超低周波域の周波数特性を規定する場合、阻止コンデンサ C と負荷抵抗 R の積である時定数 ($T=CR$) で示し、心電図では 1.5 秒以上必要とする。ここでは図 6 のように 2 段 CR 結合として過渡応答特性をよくしている。なお回路では、測定の効率を上げるため信号の基線を短時間で戻すためのインストスイッチを取り付けている。これは CR の抵抗をスイッチでショートさせ、時定数を小さくしている。

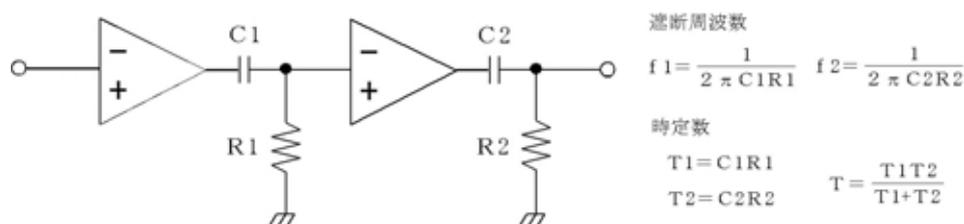


図6 2段 CR 結合

説明：非反転増幅回路

非反転増幅回路は、入力電圧と同じ位相（極性）の出力電圧が得られる回路である。図7の+入力ピンに電圧 E_i を加えると、それを無限大に近い増幅度で増幅した同相電圧が出力ピンに現れるが、それはすぐ R_2 と R_1 を通して - 入力ピンにフィードバックされる。この電圧は出力電圧を打ち消す方向に作用し、 E_i と E_o は一定のバランス状態で安定する。これは、 E_i と R_1 両端の電圧が等しくなるような状態なので、増幅度 A_v は R_1 および R_2 の値によって定まることになる。

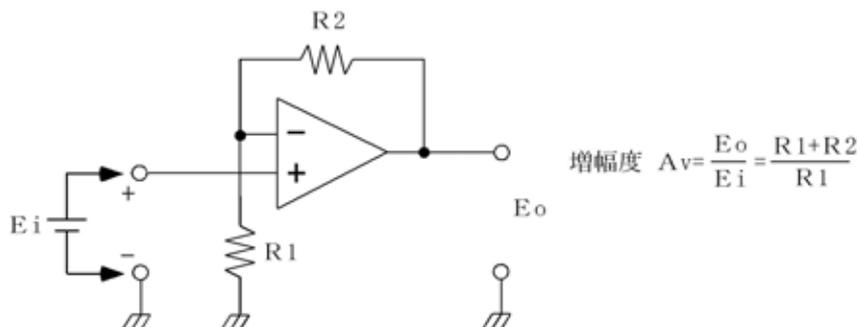


図7 非反転増幅回路

実装手順：

1-4 手順3の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。なお SW1-1 は、外付けとなるので製作手順8でコネクタ配線となる。

動作確認：

チェックピン1にオシレータより任意の信号波形を入力し、規定の増幅がされているか出力（チェックピン2）をオシロスコープで確認する。

製作手順4 ローパスフィルタ（50Hz）の製作

説明：アクティブフィルタ回路

フィルタとは希望する周波数帯域だけを通し、他の周波数を阻止するものである。フィルタを周波数特性から大別すると低域通過のローパス・フィルタ、高域通過のハイパス・フィルタ、帯域通過のバンドパス・フィルタ、帯域阻止のバンド・エリミネーション・フィルタに分けられる。またその構成部品から考えると $L \cdot C \cdot R$ などの受動素子を組み合わせたパッシブフィルタに対し、トランジスタ・OP アンプなどの能動素子を加えて構成したフィルタのことをアクティブフィルタという。

アクティブフィルタの周波数特性は、 $C \cdot R$ 定数の組み合わせによりバターワース、ベッセル、チェビシェフ、その他各種の特性が得られる。それらの特性について以下に示す。

バターワース特性

最大平坦特性とも呼ばれる。そのなのとおり周波数特性に凹凸のないのが特徴。

ベッセル特性

過渡的な入力に対し比較的平坦なレスポンスを示す。

チェビシェフ特性

周波数特性や過渡特性に多少のリプルがあるが、できるだけシャープな帯域幅を得たいときに有利。

図 8 は、バターワース特性 2 次 LPF の具体例である。図において、ここでは $R1 \cdot R2$ を同じ値にして、 $C1 \cdot C2$ の組み合わせを変えることでバターワース特性を得ている。HPF のときは、 R と C を入れ替えれば同様に考えることができる。

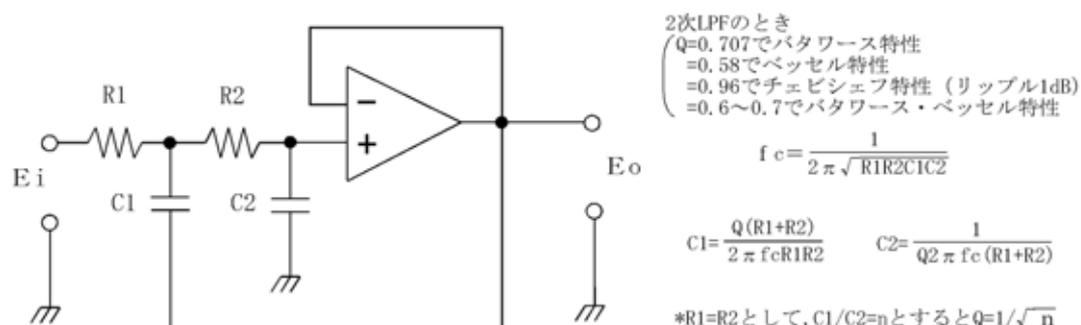


図 8 ポジティブフィードバック型 2 次 LPF

実装手順：

1-4 手順 4 の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。

動作確認：

IC4 を取り付け、チェックピン 2 にオシレータより任意の信号波形を入力し、オシレータの周波数を変化させることにより出力 (チェックピン 3) の減衰特性をオシロスコープで確認する。

製作手順 5 CR 結合 2・非反転増幅回路 (GAIN : 100 倍) 部の製作

説明：製作手順 3 参照

実装手順：

1-4 手順 5 の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。なお VR1 は外付けの可変抵抗器である。動作確認のため製作手順 8 のコネクタの配線図を参照し、コネクタとの接続を行う。

動作確認：

IC4 を取り付け、チェックピン 3 にオシレータより任意の信号波形を入力し、VR1 の抵抗値を変えることにより規定の増幅がされているか出力 (チェックピン 4) をオシロスコープで確認する。

製作手順 6 半波整流回路部の製作

説明：半波整流回路

電流の向きを一方向のみに限定する作用を整流といい、整流回路はダイオードを用いて作る。ダイオード単体の整流回路では、どうしてもダイオードの順方向電圧分の電圧降下を生じてしまうため、OP アンプを利用した理想ダイオード回路が使用されている。図 9 は反転型理想ダイオードといい、反転アンプとダイオードを組み合わせたものである。E_i < 0 のとき D₂ が ON になって負帰還が働き、E_o = - E_i となる。E_i > 0 のときは D₂ が OFF になって、回路の出力を OP アンプ出力と切り離す。同時に D₁ が ON になって内側の負帰還ループが働くので E_o = 0 となる。また D₁・D₂ の向きを逆向きにすれば、逆向きの整流回路になる。

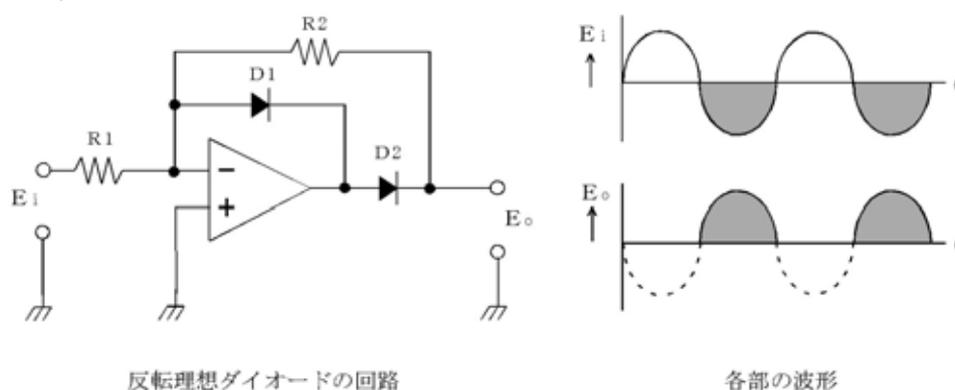


図 9 半波整流回路

実装手順：

1-4 手順 6 の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。

動作確認：

IC5 を取り付け、チェックピン 4 にオシレータより正弦波形を入力し、オシロスコープで出力（チェックピン 5）が半波整流されていることを確認する。

製作手順 7 コンパレータ回路（電圧比較回路）部の製作

説明：コンパレータ回路

コンパレータは、オペアンプの 2 本の入力ピンについて、そのどちらの電圧が相対的に高いか、あるいは低いかを検出する回路のことである。増幅回路と異なり、ネガティブフィードバックをかけていないので、両入力ピンの間にはイマジナリショートの関係が成立しない。図 10 のように OP アンプの 2 本の入力ピンのうち片方を比較基準電圧 E_r に固定し、もう一方に被比較入力電圧 E_i を加える。OP アンプは裸利得の状態で作動しているから、E_i が E_r よりほんのわずかでも大きいか、または小さければ出力電圧 E_o は +側飽和出力電圧 + E_{os}、または - 側飽和出力電圧 - E_{os} のどちらかになる。

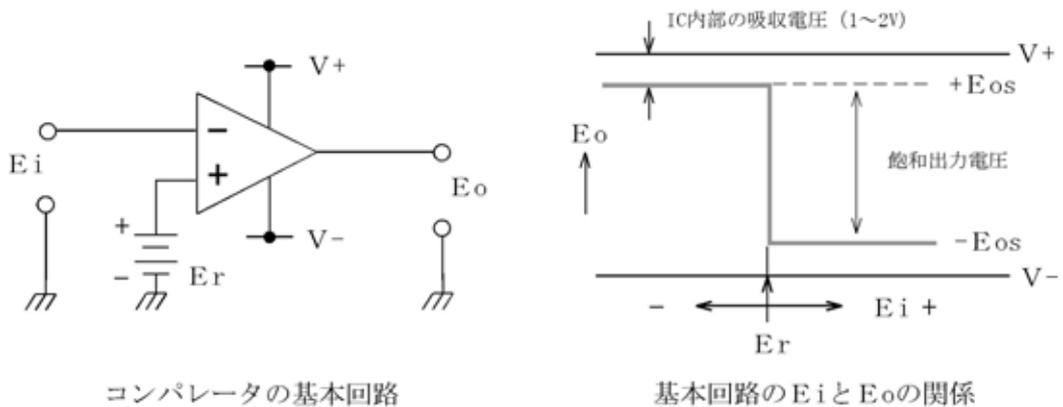


図 10

実装手順：

1-4 手順 7 の項目を参照し正しい位置に部品を挿入し、はんだで固定する。

動作確認：

IC5 を取り付け、チェックピン 5 に信号を入力し、出力 (チェックピン 6) をオシロスコープで確認する。そして VR2 を調整して信号の閾値を 5 V に設定する。

製作手順 8 コネクタの配線

実装手順：

図 11 に示すようにコネクタと部品の配線を行う。

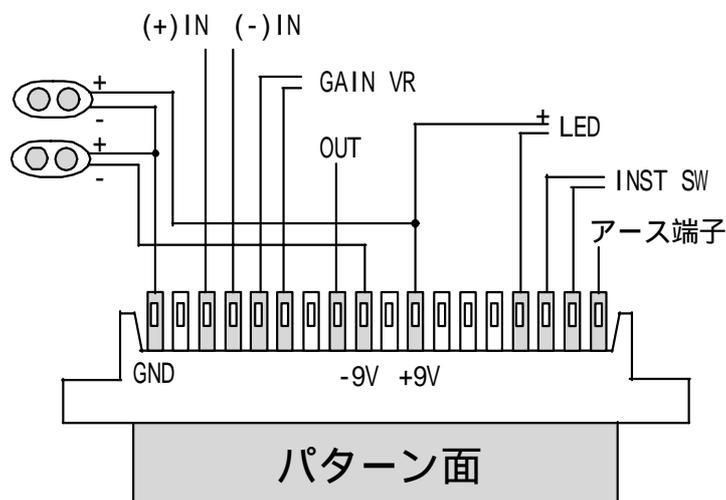


図 11 コネクタ配線図

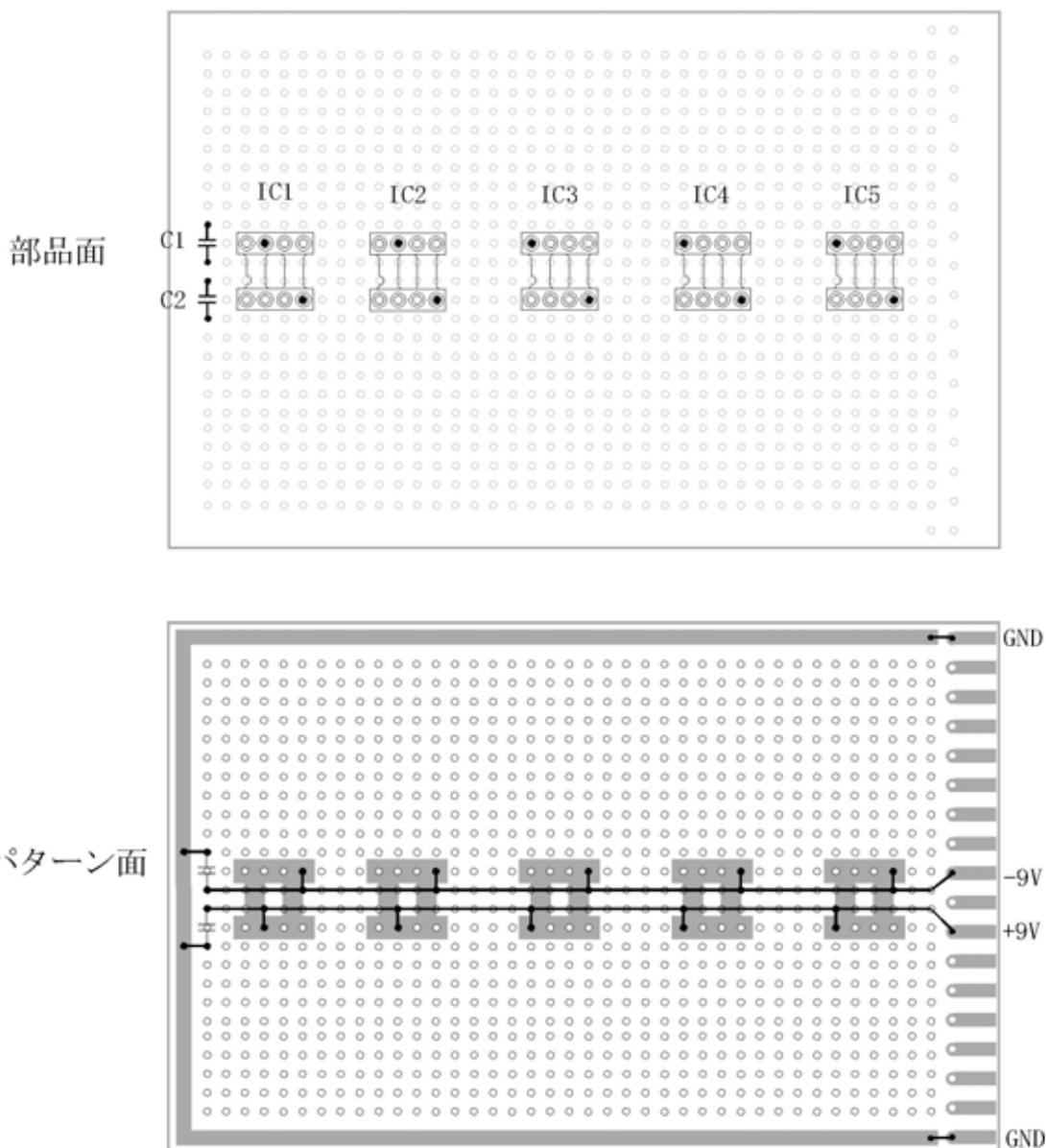
製作手順 9 ケース実装

実装手順：

1-5 実装図を参照しながらケースの所定位置に部品を取り付け、配線する。LED など極性のあるものには注意すること。最後に製作した基板をコネクタに差し込んで完成させる。

1-4 実体配線図・使用する部品

手順1. ソケット取り付け・電源ライン製作

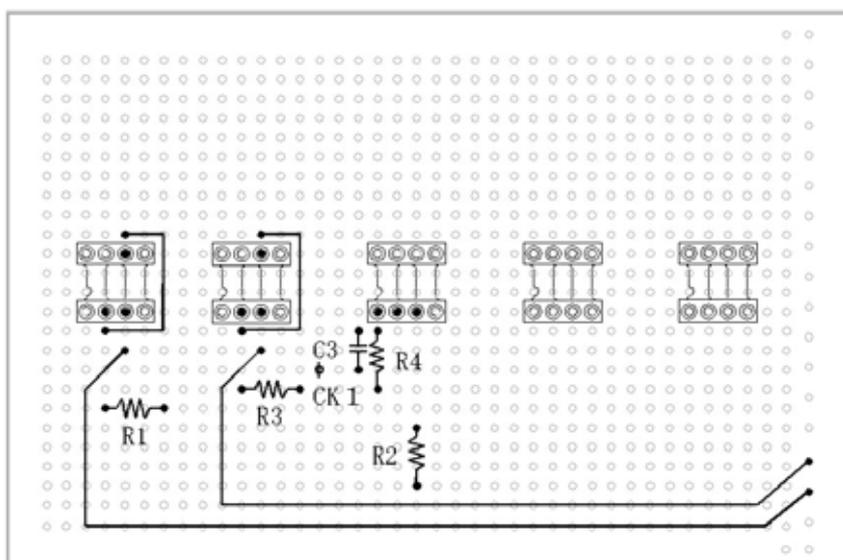


使用する部品

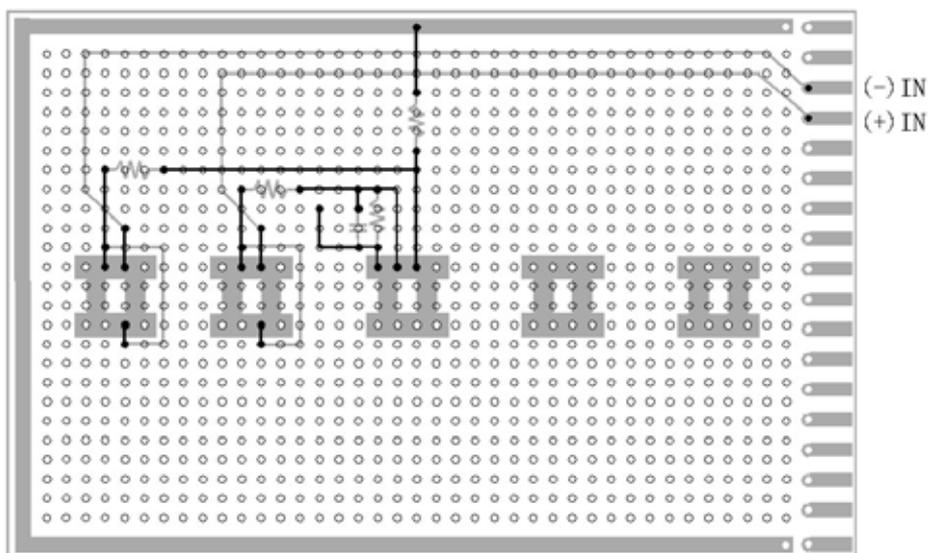
部品名	規格	個数	記号	備考
プリント基板	サハヤ UK-18P-69	1		片面プリント
IC ソケット	2 列 - 8 ピン 端子	5	IC1-IC5	方向注意
コンデンサ (積層セラミック)	50V, 0.1 μ F	2	C1, C2	
スズメッキ線				

手順 2. 差動増幅回路の製作

部品面



パターン面

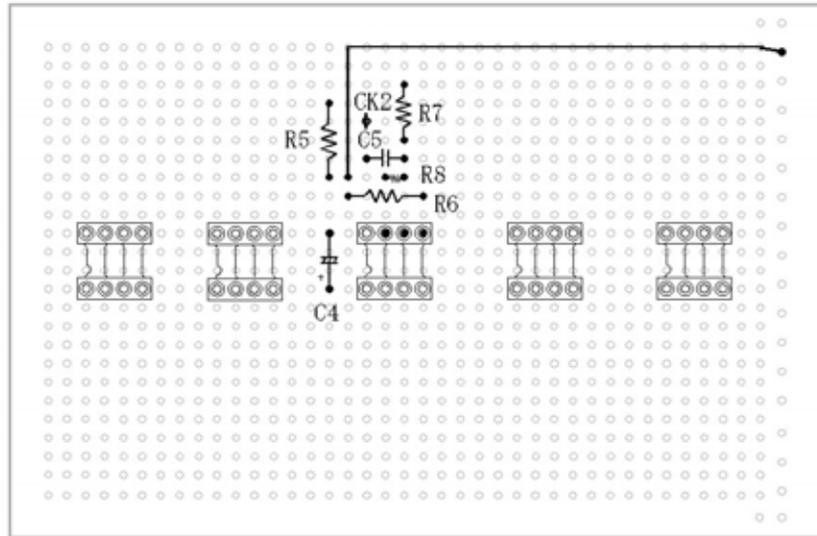


使用する部品

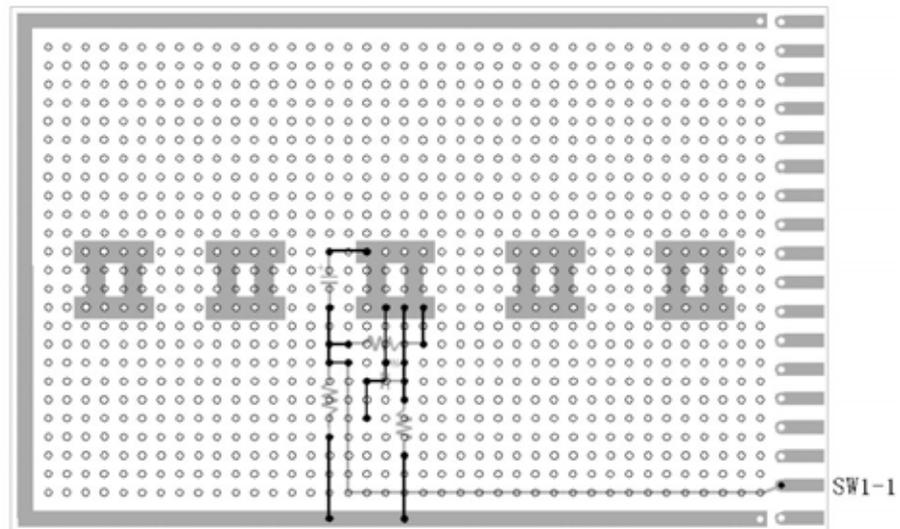
部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	LF356	2	IC1,IC2	方向注意
オペアンプ	TL072	1	IC3	方向注意
抵抗	1k	1	R1	茶黒黒茶茶
抵抗	10k	1	R2	茶黒黒赤茶
抵抗	1k	1	R3	茶黒黒茶茶
抵抗	10k	1	R4	茶黒黒赤茶
コンデンサ (積層セラミック)	0.1 μ F	1	C3	
チェック端子		1	CK1	
配線用コード				

手順3. 非反転増幅回路の製作

部品面



パターン面

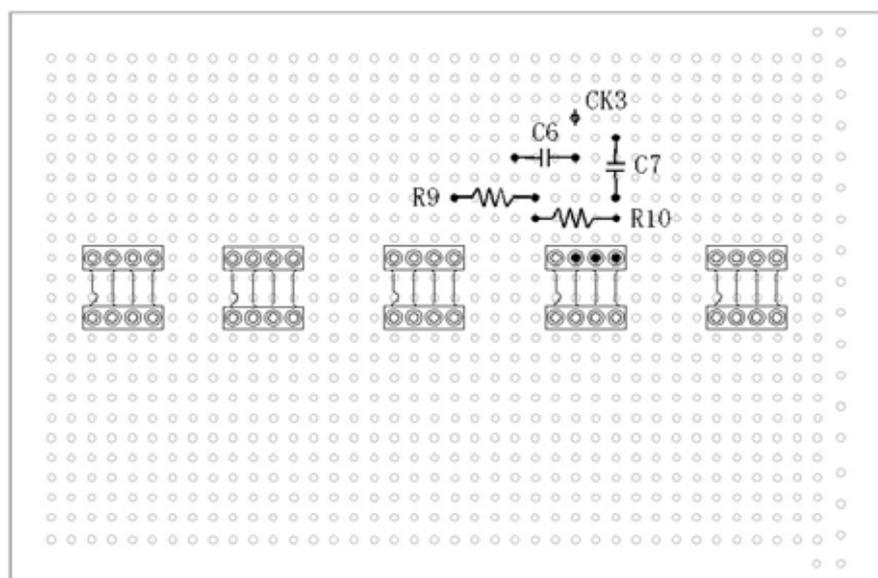


使用する部品

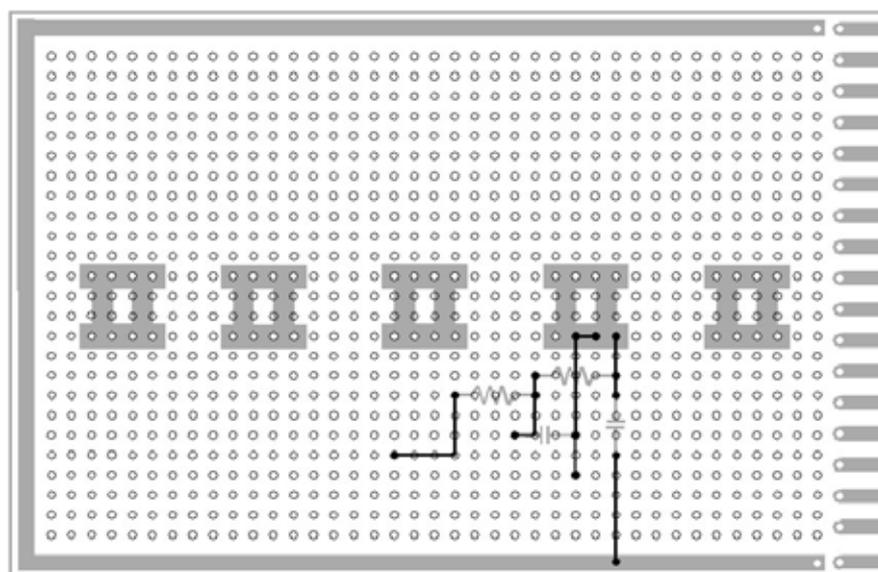
部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	TL072	1	IC3	方向注意
抵抗	1M	1	R5	茶黒緑金
抵抗	1Mk	1	R6	茶黒緑金
抵抗	10k	1	R7	茶黒黒赤茶
抵抗	100k	1	R8	茶黒黒橙茶
コンデンサ (電解)	1 μ F	1	C4	極性あり
コンデンサ (積層セラミック)	0.1 μ F	1	C5	
チェック端子		1	CK2	
配線用コード				

手順4. ローパスフィルタ回路の製作

部品面



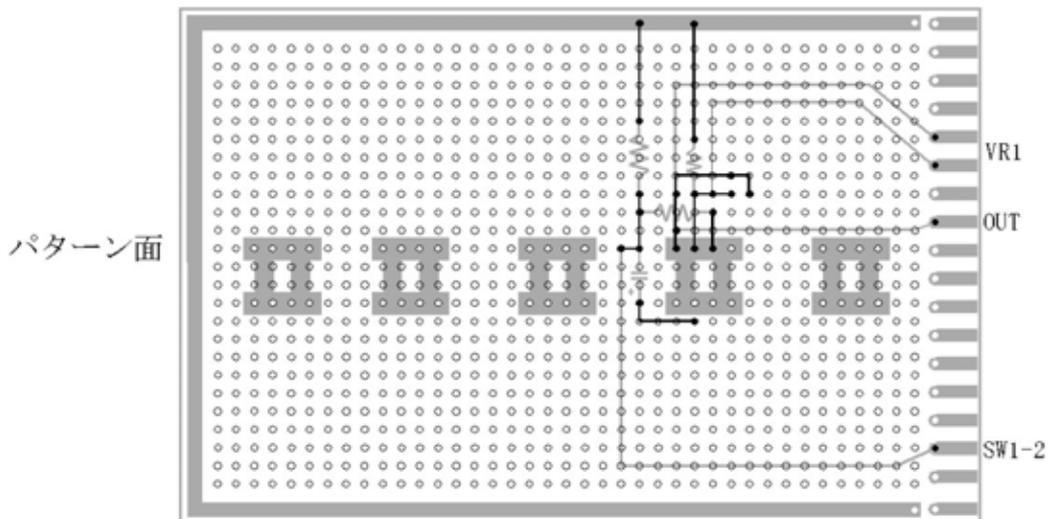
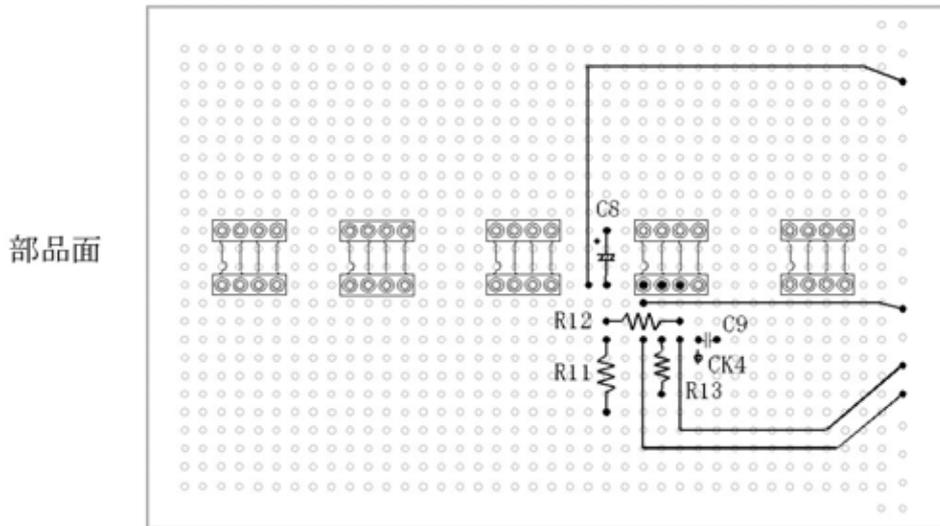
パターン面



使用する部品

部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	TL072	1	IC4	方向注意
抵抗	100k	1	R9	茶黒黒赤茶
抵抗	100k	1	R10	茶黒黒赤茶
コンデンサ(MKT)	0.47 μ F	1	C6	
コンデンサ(MKT)	0.22 μ F	1	C7	
チェック端子		1	CK3	

手順5. 非反転増幅回路の製作

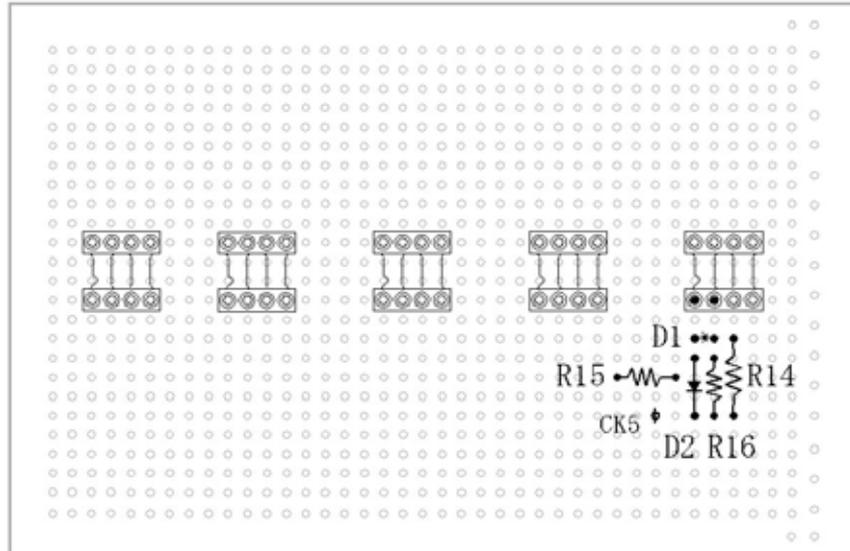


使用する部品

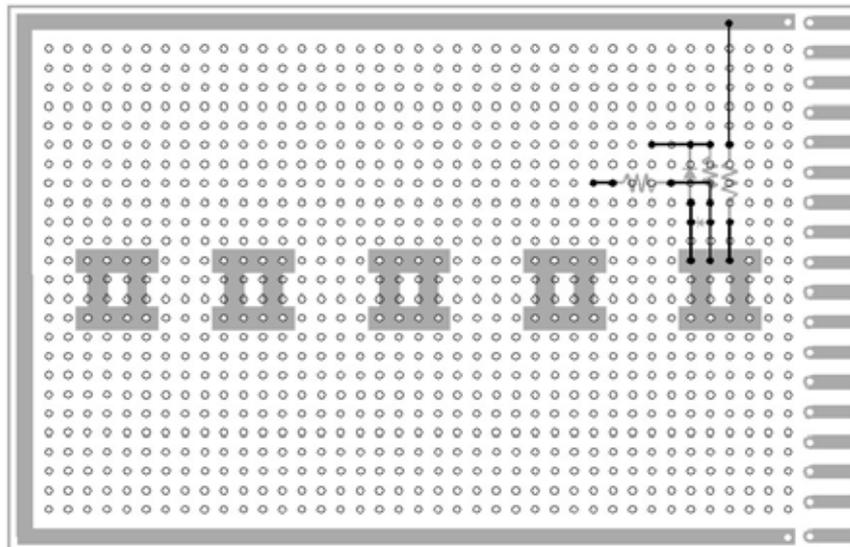
部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	TL072	1	IC4	方向注意
抵抗	1k	1	R11	茶黒黒茶茶
抵抗	1M	1	R12	茶黒緑金
抵抗	1k	1	R13	茶黒黒茶茶
可変抵抗器	100k	1	VR1	茶黒黒赤茶
コンデンサ (電解)	10 μ F	1	C8	極性あり
コンデンサ (セラミック)	330pF	1	C9	
チェック端子		1	CK4	
配線用コード				

手順6. 半波整流回路の製作

部品面



プリント面

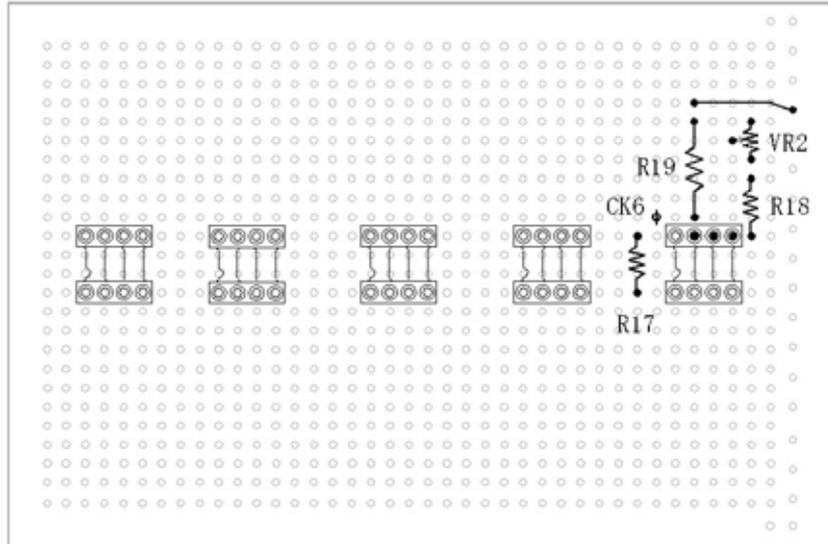


使用する部品

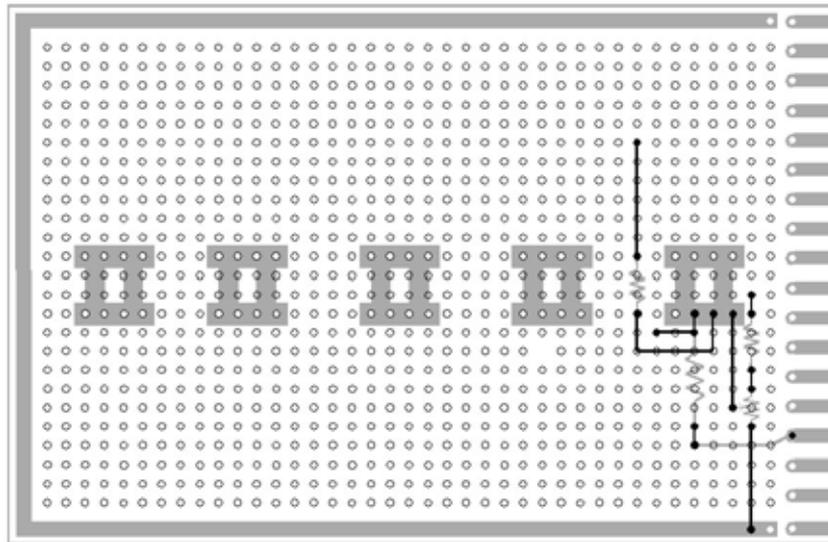
部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	TL072	1	IC5	方向注意
抵抗	5.1k	1	R14	緑茶黒茶茶
抵抗	10k	1	R15	茶黒黒赤茶
抵抗	10k	1	R16	茶黒黒赤茶
整流ダイオード	1S1588	1	D1	
整流ダイオード	1S1588	1	D2	
チェック端子			CK5	

手順7. コンパレータ回路の製作

部品面



パターン面

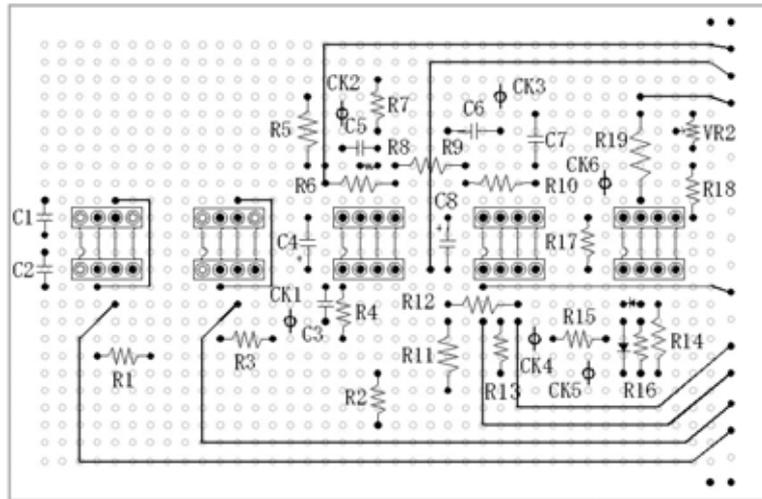


使用する部品

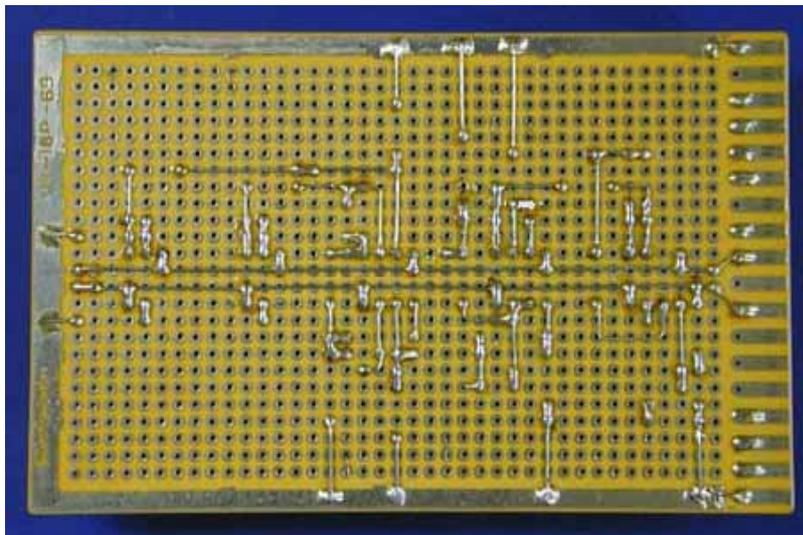
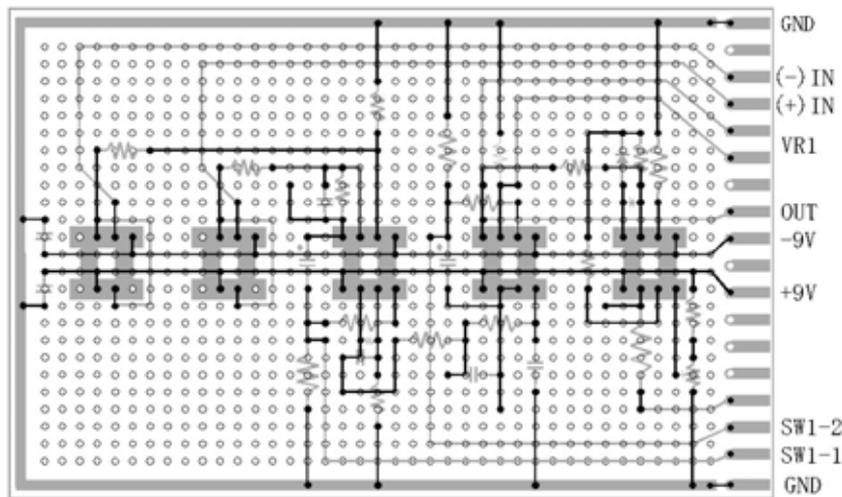
部品名	規格	個数	記号	備考
オペアンプ	TL072	1	IC5	方向注意
抵抗	1k	1	R17	茶黒黒茶茶
抵抗	1k	1	R18	茶黒黒茶茶
抵抗	1.5k	1	R19	茶緑赤金
トリマー	10 k	1	VR2	
発光ダイオード		1	LED	方向性あり
チェック端子			CK6	

完成配線図

部品面



パターン面



1-5 実装図

