

2018 後期実習

# 1SP エレクトロニクス演習

-手作り実験の手引き-

北里大学理学部物理学科

担当 吉國 裕三

学籍番号

---

氏名

---

# ISP エレクトロニクス演習—手作り実験の手引き—

1998年4月1日 北里大学理学部 前田 忠計 著  
2018年8月22日 北里大学理学部 吉國 裕三改訂

1 .物理学科1年生の皆さんへ .....	1
2 実験セットの点検 .....	4
2.1 実験セットの内容 .....	4
2.2 抵抗値のカラーバンド表示 .....	5
2.3 テスターの動作 .....	6
2.4 半田付けについて .....	9
2.5 ブレッドボード .....	10
3 抵抗と豆電球の電圧・電流特性 .....	11
3.1 実験のパートナー .....	11
3.2 目的 .....	11
3.3 実験手順 .....	11
3.3.1 実験ノート .....	11
3.3.2 準備作業 .....	11
3.3.3 その他の準備 .....	12
3.3.4 実験1：抵抗の電圧・電流特性 .....	13
3.3.5 実験2：豆電球の電圧・電流特性 .....	14
4 発光ダイオードと乾電池の電圧・電流特性 .....	14
4.1 目的 .....	14
4.2 背景 .....	14
4.2.1 発光ダイオード .....	15
4.2.2 乾電池 .....	15
4.3 実験手順 .....	16
4.3.1 実験1：LEDの電圧・電流特性 .....	16
4.3.2 実験2：アルカリ単3電池の内部抵抗 .....	17
4.3.3 電圧分割回路を使った電圧源の内部抵抗 .....	18
5 デジタル回路の基礎 .....	19
5.1 目的 .....	19
5.2 背景 .....	19
5.3 デジタル回路の基本特性の測定 .....	21
5.3.1 実験1：2入力NANDゲートの入出力特性 .....	21
5.3.2 実験2：2入力NANDゲートの動作 .....	21
6 カウンターの作製 .....	22
6.1 フリップフロップ回路 .....	23
6.2 フリップフロップを用いたカウンター .....	24
6.3 カウンター表示回路 .....	25
6.4 追加課題（タイマーの製作） .....	26

## 1. 物理学科1年生の皆さんへ

1996年12月に亡くなったカール・セーガン博士は、アメリカの惑星探査計画や地球外知的生命の電波探査計画に深く関与した著名な物理学者である。セーガン博士の著書の中に次の文章がある。

「小中学校や高校時代に出会ったすばらしい理科の先生の話でもできればいいのだが、そんな先生は一人もいなかった。理科の時間ということで思い出すのは、ひたすら丸暗記させられたことばかりだ。元素の周期率表、てこや斜面の問題、光合成、無煙炭と渥青炭の違い等々。それに対して、胸のすくような驚異の感覚や、進化論的なものの見方や、かつてはこんな誤った考えを誰もが信じていたんだよ、といった話は、一度だって出てこなかった。高校の実験授業では、はじめから出すべき結果が決まっていた。その結果を出さないと減点されるのだ。自分が面白いと思うことをとことん追求してみるとか、直感的に得たアイデアを検証してみるとか、間違った概念のどこが悪かったのかを考えてみる、などと言われたことは一度もなかった。(中略) 教えられた通りに覚えるのが生徒の仕事だった。正しい答が得られさえすれば、自分が何をしているかなどわかっていなくてもよかったのだ。」

このセーガン博士の記述は、1940年代から50年代にかけてのアメリカの初等、中等教育についてのものであるが、君達が今までに受けてきた教育でも、先生は「教える人」、生徒は「教わる人」(受け身の存在)という役割分担の固定化があったのではないか? 大学生になった君達のなかに、「勉強とは教えられた通りに覚えること」という意識が残っているのではないか?

### 大学における学習

知識は記憶し、暗記し、再生するものではない。そんなことは、百科事典やCD-ROMなどの情報技術に任せておけばよい。大学における学習の中心は、創造的に思考し、問題を発見し解決する力を養い、生涯を通じて学び続ける意欲を育成することである。「力を養い、意欲を育成する」主体は君達自身である。大学での先生の役割は、「教える人」というよりはむしろ「学生の学習を支援する人」であり、大学生は「教えられた通りに覚える」存在(知識の消費者)ではなく、むしろ「能動的に自分の力を高め、知識を作り出す」存

在(知識の生産者)になることを期待されている。

この「エレクトロニクス実験演習」では、回路部品を組み合わせ自分で装置を組み立てる。自作の装置を使って実験もする。もし作った装置がうまく働かなかつたら、何がトラブルの原因かを自分で探り解決する。うまく働くときには、装置を校正し、データを出す。このようなことをする実験演習は、学生諸君が悲鳴をあげるような難しい科目だろうか? 私は、そうではないと思う。子供時代に鉄棒が苦手だった人は、それまでできなかった逆上がりをはじめてできたときの達成感を思い出してほしい。子供時代にエンジン付き模型飛行機を自作しうまく飛ばせた経のある人は、そのときの感動を思い出してほしい。それと似た満足感がこの実験演習でも味わってもらえるだろう。この達成感があって初めて、学生諸君のなかに「学ぶことは楽しい」という感覚が湧いてくるのではないだろうか?

### なぜ Do It Yourself?

ここでやろうとしているエレクトロニクス実験演習のスタイルは、(先生が講義し学生がそれを聞くのではなく) "Do it yourself!"、"日曜大工"的方法を基本にしている。学生諸君が装置を自作することで、次の効果が生まれることを期待している。

・エレクトロニクスは工学部や物理学科の学生が頼りにするべき道具であり、現代社会の至る所で使われている技術である。病院の診察室、自動車のエンジン制御、カーナビゲーション、America's Cupのヨットの中等々。このように重要なエレクトロニクスの基礎が、この実験演習で身につけられる。

・教科書の中の演習問題は多くの場合、現実からかけ離れた理想的に単純化された場合について、問題を考えさせる。これとは違い、ここで取り上げる実験は、驚くほど複雑で多くの側面が含まれているので、学生がじっくり考え、アイデアを出さなければ、問題が解決できない。良い例は、テレビ番組の「ロボットコンテスト」であ

る。限られた時間内にそれ程豊富でない材料を使って、「玉入れ」をし、かつ相手のロボットの動作を妨害しながらコンテストで勝ち残るためには、参加者がロボットのデザイナー、発明家、操縦者の能力すべてを兼ね備える必要がある。

・この手作り工作の中で、エレクトロニクスの背後にある物理を学び、抽象的な物理の概念がもっと身近になる。上級生になって物理の講義レベルが高くなっても、ある程度直感的に理解できるようになるだろう。

### 気をつけてもらいたいこと

学生諸君が物理と数学について初歩的な学習をすましていることを想定して、この科目を構成した。

この科目では、それぞれの実験課題ごとに、装置を組み立て実験する。所要時間は1課題あたり3時間から6時間だろう。装置の中には、注意深く回路図を読み、半田付けしなければならないものもある。中学・高校時代に回路工作を経験した人には簡単に思えることも未経験者にとっては難しいかもしれない。しかし経験者といっても、ここで取り上げた実験をすべて経験した者はいないだろうから、みんな多かれ少なかれトラブルに出会うことになる。少々のトラブルでくじけないこと。

実験課題のなかには、二人で協力して行う課題もある。たとえばテスターや電池など手持ちの装置だけでは足りないため、二人の装置を持ちよって実験をする課題である。また、実験自体は手持ちの装置一人分で間に合うが、学生相互でディスカッションしながらすすめてもらいたい課題もある。

共同実験者とディスカッションしながら具体的な課題に取り組むことは、学生個々人の考え方を深めるのに非常に有効である。お互いの意見を相手に分かりやすく伝えること、討論することが大事であり、どちらか一方だけが話し手で、他方はもっぱら聞き役というような状態はディスカッションではない。あるときは話し手であり、つぎには聞き役になるような意見交換をしてもらいたい。二人で協力して行う課題では、考えたり手を

動かしたりすることを共同実験者に任せっきりではいけない。君たちの頭は考えるためについているのであり、帽子を乗せるためだけに存在しているのではない。自分の頭で考え、実験の途中でも互いに質問しあうことが大事である。実験課題がトラブルなしに、期待通りに進むことはまず無い。配線を間違えると、物理法則に従ってトラブルが発生する。当初の期待が外れたとしても、それは配線間違いのために起こった「必然」的结果であるから、起こった結果から原因（配線間違い）を見抜く目を養うように心がけてほしい。

トラブルを乗り越え、実験課題を最後までやりとげた後の達成感を大事にしてもらいたい。手作りのエレクトロニクス装置を使い、課題を達成したときの喜びは、研究者やエンジニアが味わっているのとまったく同質のものである。この喜びを学生諸君が感じてくれることを願っている。

### 安全第一！

#### 小電流でもこわい

ヒトの体液（血液、リンパ液）はNaCl等の無機塩類を1%弱含み、金属よりは電気伝導度が低い、プラスチックやガラスのような絶縁体に比べると電気をはるかによく通す。指先から肩までの内部抵抗は100Ωより小さく、ここに10Vの電位差を与えると100mA程度の電流が流れる。100mAの電流を大きいと考えるか小さいと考えるかは考える対象にもよるが、人体への影響という観点では100mAの電流は「死ぬかもしれない」程の大きさである。図1は電流の大きさと人体への影響との関係を示したものである。

人体への電流の作用は、(1)消費電力( $W = VI$ )が熱に変わり温度が上昇することによる火傷、(2)電気化学的に細胞の膜電位が変化することによる神経系の制御不能、呼吸筋・心筋の停止、の二つが主なものである。火傷を起こさないような100mA以下の小電流であっても神経系への影響は大きく、人体に永久的な障害を残す可能性もある。

#### 電流と人体

この点に関しての経験的(!)知識は次のようにまとめられている。

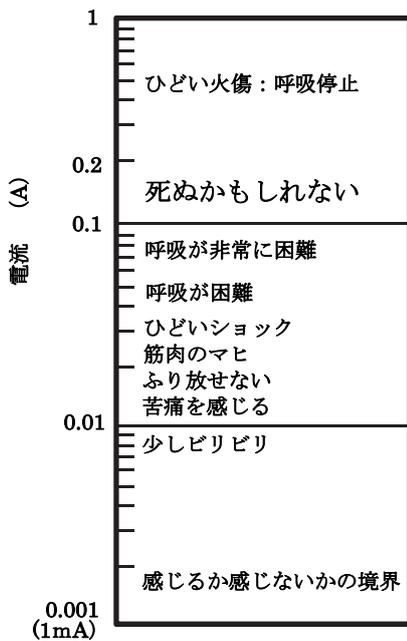


図 1:電流の大きさと人体への影響

- 0.5 mA 以下の電流は、ほとんど感知できない。0.5mAから 10 mA までの電流は人体に感知されるが、重大な障害を引き起こすことはないだろう。電流が 500 mA であっても時間が非常に短ければ (10 ms 以下)、重大な障害には至らない。
- 5 mA から 20 mA までの電流が数秒以上継続して人体を流れれば、筋肉がけいれんし自らの力で電線から身体を引き離すのが困難になる。電流が継続している間、恐怖のため心臓の動悸が激しくなり、呼吸も荒くなるが、電流が流れなくなればこれらの症状は見られなくなり、通常は後遺症が残ることもない。
- 電流が 20 mA 以上になると生命に危険がある。電流が大きくなるにつれて心臓停止の危険性も増大する。

#### 感電しないためにはどうすればよいか

感電事故を避ける唯一の方策は次の通りである：「何かする前に、自分が何をしようとしているかを考えること。」手が滑ったりして、触れてはいけないところに手が接触したら、何かおきるかを予測しよう。どれくらいの電圧がかかり、どれくらいの電流が流れるだろう？ こういう予測が的確にできれば、軽率に感電事故を起こすことは避けることができる。手が電線に接触したとし

よう。人体内部の体液と電線との間には皮膚が存在する。乾燥した皮膚の抵抗は、接触面積がそれほど大きくない限り 10 kΩ から 100 kΩ 程度である。電圧が 50 V 以下であれば、(皮膚が乾燥している場合に限り) 電線から人体へ流れる電流は 0.5 mA から 5mA の範囲に収まることになる。手が濡れていたり汗ばんでいるときには、50V 以下の回路を扱っていても感電事故が重大な結果になることを十分理解しておいてもらいたい。

回路に 100 V 以上の電圧がかかっているときには、感電事故はとりわけ危険である。家庭の電線には交流 100 V の電気が来ているから、家庭での感電事故も同様に危険であり、死ぬ可能性もある。回路に電圧がかかっている状態での作業は絶対にしないこと。装置の電源スイッチを落とし、ACコンセントから電源プラグをはずした状態で作業すれば、感電事故は防ぐことができる。どうしても必要な場合には、回路に電圧がかかっている状態で作業することもあるが、その場合「自分が死と隣り合わせで作業している」ことを頭にたたき込んでおいて欲しい。このような作業をするとき、熟練者は片手をポケットに入れている。片手で作業をしている状態で感電事故を起こしても、電流は心臓を通らない。両手作業のときの感電事故は、たとえば右手から左手に電流が流れたら、心臓は電流の影響で停止してしまうだろう。予防第一を心がけてもらいたい。

#### 「エレクトロニクス実験演習」の背景

この実験演習の内容を構成するときに、アメリカのマサチューセッツ工科大学とカリフォルニア工科大学で行われている新入生向けの電磁気学実験のカリキュラムを参考にした。それを我々の大学に合うように組み替え、1998年度から「エレクトロニクス実験演習」の科目を始めた。その後、エレクトロニクスの進歩に合わせ実験内容が変化したため、2012年に大幅な改定を行った。細かい実験手順については毎年、部品変更などが起きるため別紙として記述している。合わせて別紙の内容を参照してほしい。今後、この科目の内容を充実していく上で、学生諸君からの批判を参考にしたい。色々の声を指導教員に寄せてもらいたい。

## 2 実験セットの点検

### 2.1 実験セットの内容

下に、この科目で使う工具と部品の一覧表を示した。工具は、工具箱も含めて各自に1セットずつ貸与するので、工具箱に学籍番号と名前を明記したラベルを添付すること。工具セットは君たちの後輩も使うことになるので、なるべく壊さないように、なくしたりしないで使って欲しい。必要ならば、工具箱を自宅や下宿に持ち帰ってもよいが、今年12月までには返却して貰いたい。週2回、水・木の午後がエレクトロニクス演習の時間であるが、必要な工具および部品は上記の通り君たちの手元にあるのだから、興味のある人は自主的にどんどん先に進んでやってもらいたい。

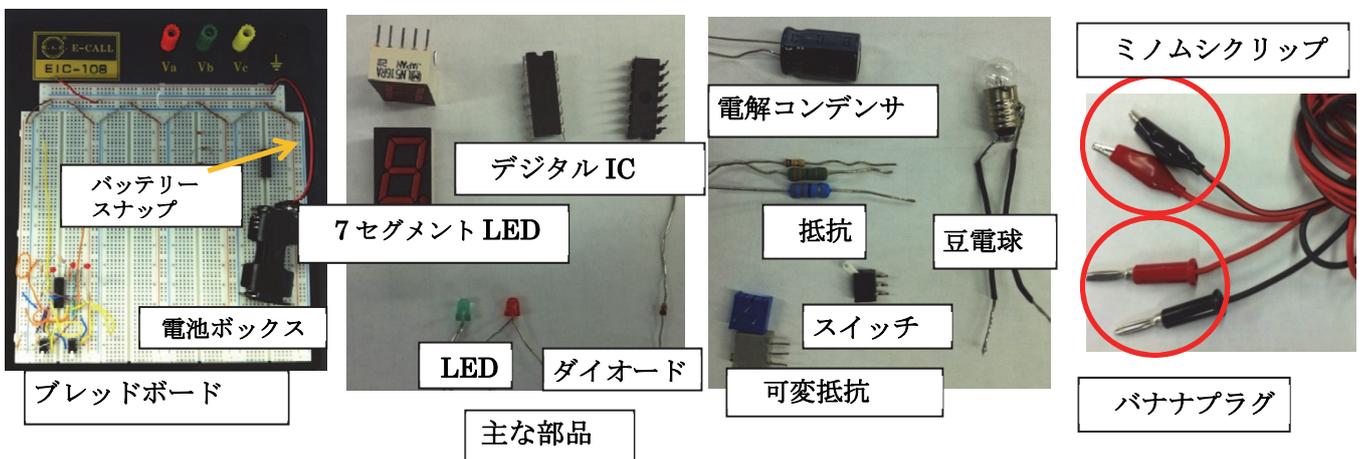
### 3) 電池ボックスの使い方

(a) デジタル回路などで6V固定の場合はバッテリースナップを用いる。(4本直列)

(b) アナログ回路の実習では電圧を、1.5V、3V、4.5V、6V と変える場合がある。この場合には右図のようなリード線付の卵ラグ（あらかじめ、半田付けしておく）を用いる。電池ケース中では、4本の電池が直列に繋がっているの、適当な位置で電池の⊕端子とケース電極の間にリード線付卵ラグを挿入して、このリード線とバッテリースナップの⊖側リードとの間で電圧を取り出す。電池ケースから電池を取りだして電極間の接続を観察し、どの位置に卵ラグを挿入すれば、電池1本、2本直列、或いは3本直列の電圧が得られるか考えなさい。



主な工具：ラジオペンチ、ニッパー、ドライバセット、 テスター、 半田ごて及び半田ごて台



## 2.2 抵抗値のカラーバンド表示

抵抗には4本又は5本のカラーバンドが印刷され、図2に示すように、これによって抵抗値と許容誤差を表している。4本の場合には抵抗の末端に1番近いカラーバンドから順に、最初の3本がオーム(Ω)で表した抵抗値、4本目が抵抗値の許容誤差を示している。最初の2本のカラーバンドが抵抗値の有効数字、3本目が桁を表す。5本の場合には有効数字を示すカラーバンドが3本になる。カラーバンドの色は0から9までの数(カラーコード)を表す。色と数との対応は、図に示すとおりで、2から7までに対応する色の順番が虹の色の順序に一致することに注意すれば覚えやすい。あるいは、図に示したような語呂合わせで覚えても良い。

- ・ 図2-2にカラーバンドと抵抗値の関係の例を示した。4本のカラーバンドでは黄、紫、オレンジで、それぞれ4、7、3で、第1、第2の4、7より有効数字は47であり、3番目のオレンジより

より桁数は3で、抵抗値は  $75 \times 10^3$ 、すなわち 47 kΩ と読みとれる。5本の例では抵抗値に3番目の黒(0)が加わり  $470 \text{ k}\Omega$  となる。

- ・ 最後のカラーバンドは、抵抗値の許容誤差(精度)を表し、各々  $\pm 5\%$ 、 $\pm 1\%$  を示している。

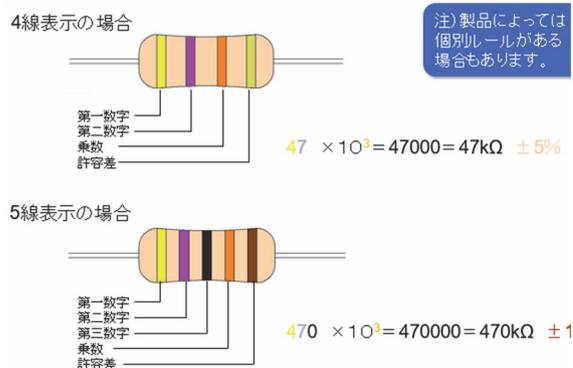


図2-2 カラーバンドと抵抗値

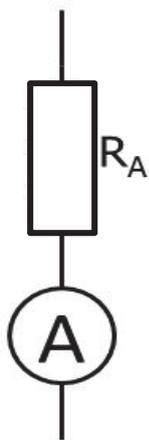
図2:抵抗のカラーバンド

色	第1数字	第2数字	第3数字	乗数	抵抗値許容差 Tolerance		覚え方
Color	1st band	2nd band	3rd band	Multiplier	±%	記号 Code	
黒 Black	0	0	0	$1(=10^0)$			黒い礼服(黒0)
茶 Brown	1	1	1	$10(=10^1)$	1	F	茶を一杯(茶1)
赤 Red	2	2	2	$100(=10^2)$	2	G	赤いニンジン(赤2)
橙 Orange	3	3	3	$1,000(=10^3)$	0.05	W	第三の男(橙3)
黄 Yellow	4	4	4	$10,000(=10^4)$			岸恵子(黄4) 女優さんです
緑 Green	5	5	5	$100,000(=10^5)$	0.5	D	緑はGo(緑5)
青 Blue	6	6	6	$1,000,000(=10^6)$	0.25	C	あおむし(青6)
紫 Violet	7	7	7	$10,000,000(=10^7)$	0.1	B	紫式部(紫7)
灰 Gray	8	8	8				ハイヤー(灰8)
白 White	9	9	9	0.001			白いクリスマス(白9)
金 Gold				0.1	5	J	-
銀 Silver				0.01	10	K	-

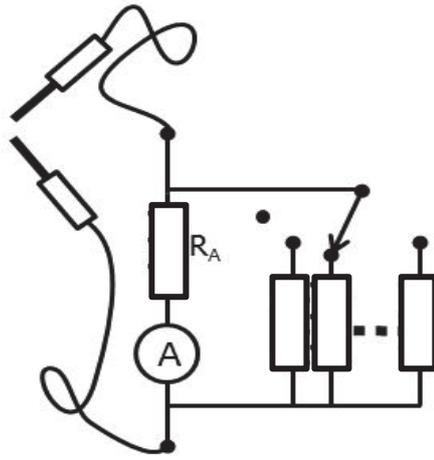
カラーバンド4本の場合

カラーバンド5本の場合

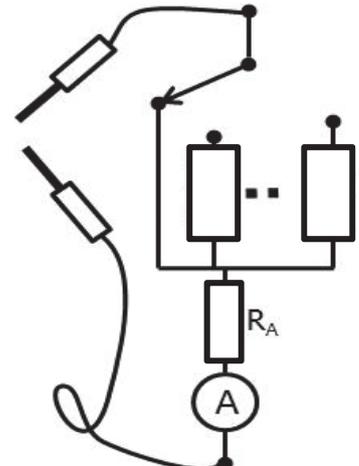




(a) テスター内部の電流計



(b) 電流測定レンジでの回路



(c) 電圧測定レンジでの回路

の最低測定レンジを兼ねており、(a)の電流計が測定対象に直接つながれる。測定レンジを変えると、電流測定では図(b)のように抵抗が並列に繋がれており、テスターを流れる電流が抵抗と電流計とに分割されるため、抵抗を小さくすることで大電流が計れる。一方、電圧測定では図(c)のように抵抗が直列につながれ、テスターにかかる電圧が抵抗と電流計に分割されるため、抵抗値を増やすと高電圧を計れることができる。

例えばCX270Nでは、電圧の0.1Vレンジは電流の50 $\mu$ Aレンジと共通である。テスターに0.1Vの電圧をかけるとメータはフルスケール（針がいっぱい振れる）になる。この時、電流計としては50 $\mu$ Aの電流が流れていることになるから、テスターにかかる電圧が0.1Vのとき50 $\mu$ Aの電流が流れていることになり、内部抵抗は、 $0.1 \text{ [V]} / 50 \text{ [\mu A]} = 2 \text{ [k}\Omega\text{]}$  で与えられる。

より大きな測定レンジ（低感度レンジ）に切り替えた場合には、回路図から解るように；

(1) 電流測定ではどのレンジでもフルスケール時に、測定端子間の電圧は常に0.1Vである。従って内部抵抗は、フルスケールの電流値を0.1Vで割ったもので与えられる。

(2) 電圧測定レンジではどのレンジでもフルスケール時には、テスターに流れる電流は常に50 $\mu$ A

である。従って内部抵抗は、フルスケールの電圧値を50 $\mu$ Aで割ったもので与えられる。

**(1) 実験事項1（抵抗のカラーバンドの理解。テスターを使って抵抗測定法を習得する）**

抵抗値のカラーバンド表示を読み、テスターによる実測値と比較する。

★ツールボックスから異なった色のカラー抵抗を8本選んで、カラーバンドの色をもとに抵抗値を計算して、右の表に書く。

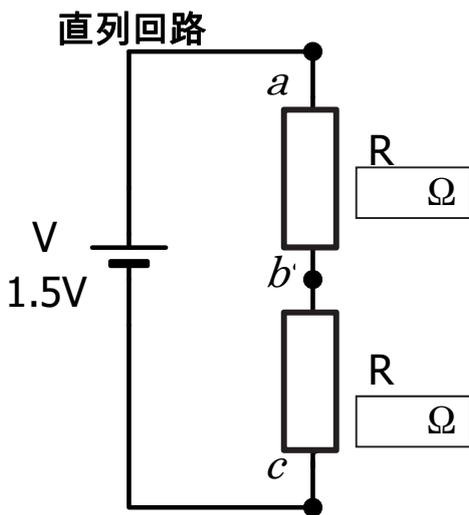
★抵抗値を計算した後に、テスターを使って抵抗値を測定し実測値を記載する。

バンドの色				抵抗値	抵抗値
1	2	3	4	計算値	実測値

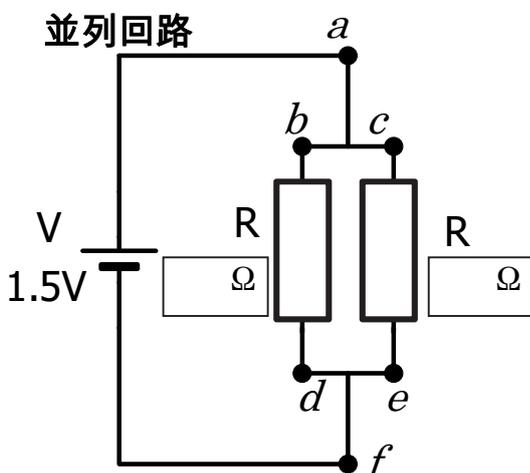
(2) 実験事項2 (テスターでの簡単な回路測定)  
 ○ツールボックスから抵抗2本 (例えば33Ω2本) を取り出し、直列・並列につないだ回路を作る。  
 ○電池と直列・並列抵抗と接続した下図のような回路を接続し、図に抵抗値を記入する。

- ★直列・並列それぞれについて、図に示した電流、電圧を計算して表に書く
- ★テスターで電流、電圧を測定して、その結果を表に書く

★この実験ではあらかじめテキスト上に回路図や数値を書き込む表が準備されていて、君たちはその中に数値を書き込むだけであったが、実際の実験では君たちが実験ノートの上に表や回路図を準備してその中に書き込みながら実験を進めることになる。この先の実験では事前に実験の内容や進め方をよく理解して、この章の表や回路図を参考にして、事前に必要な表や回路図を実験ノートの上に作成しておいて実験を進めながら空欄を埋めていくようにすること。テキストに測定項目が明記されている場合はそのデータを収容できるよう表を設計し、測定項目が明記されていない場合には実験内容を良く検討して測定項目や測定間隔など実験の詳細を設計してそれに基づいて表を作成しておくこと。



	計算値	実測値
ab 間の電圧		
bc 間の電圧		
ac 間の電圧		
aを流れる電流		
bを流れる電流		
cを流れる電流		



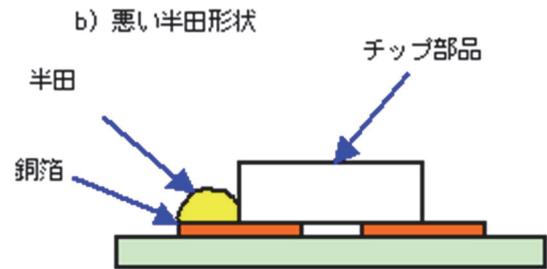
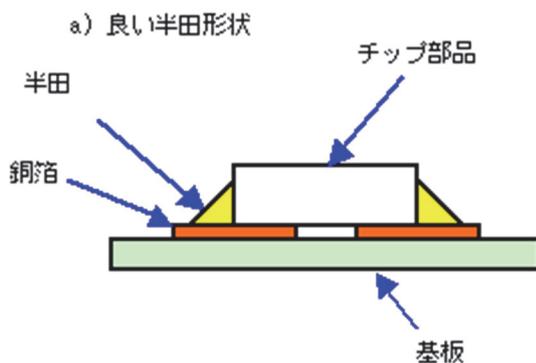
	計算値	実測値
af 間の電圧		
aを流れる電流		
bを流れる電流		
cを流れる電流		
eを流れる電流		
fを流れる電流		

## 2.4 半田付けについて

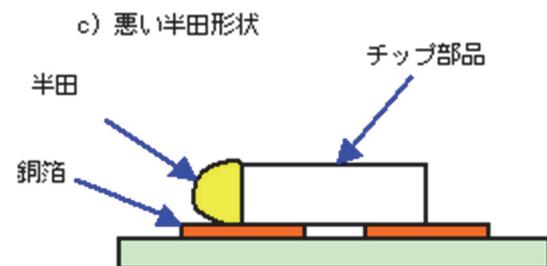
半田付けは実際に体験しないと、コツはつかめない。一般的注意点は次の通りであるが、自分で色々工夫してもらいたい。

- ・熱い半田鑊で机やノートなどを焦がさないため、周囲を整頓する。火傷にも注意。半田鑊をスタンドに乗せておくと余分の心配をしなくても良い。
- ・鑊先を半田でメッキし、ピカピカの状態しておく。しめさせたスポンジに鑊先をこすりつけ、余分の半田やフラックス（松ヤニ）の酸化物を鑊先表面から取り除いておく。
- ・半田付けをきれいにするにはコツが必要である。半田付けをする部分を鑊先で十分暖め、暖めたと同時に糸半田をふれただけで、スーッと半田が流れるような状態でなければ、半田付けはうまくできない。
- ・半田の量が多すぎても少なすぎてもトラブルの元である。

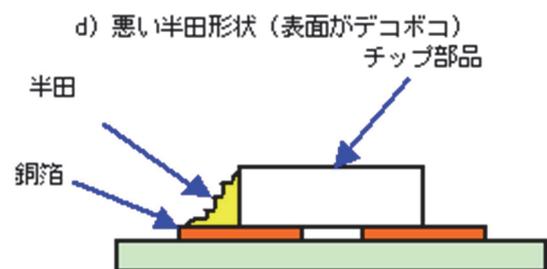
以下の図に、良いハンダ付けの例と悪いハンダ付けの例を示した。この図を参考にして、半田付けが上手に出来たかどうか、半田付けの箇所をよく見ること。



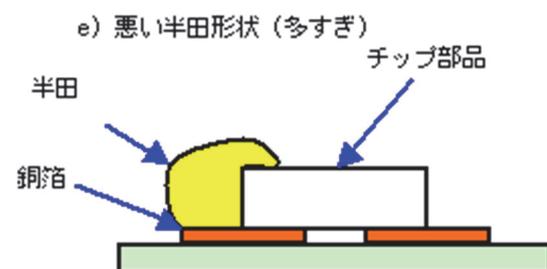
原因：チップ部品が温まっていない。（コテ先がチップ部品に触れていない。）



原因：銅箔が温まっていない。（コテ先が銅箔に触れていない。）



原因：コテ先が汚れている。ハンダが少なすぎ。ハンダが充分溶けていない。（コテ先を離すのが早すぎる。）



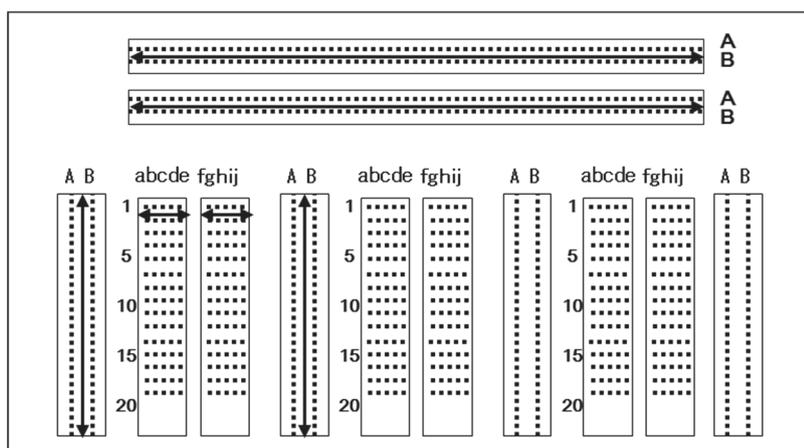
原因：ハンダが多すぎる。

## 2.5 ブレッドボード

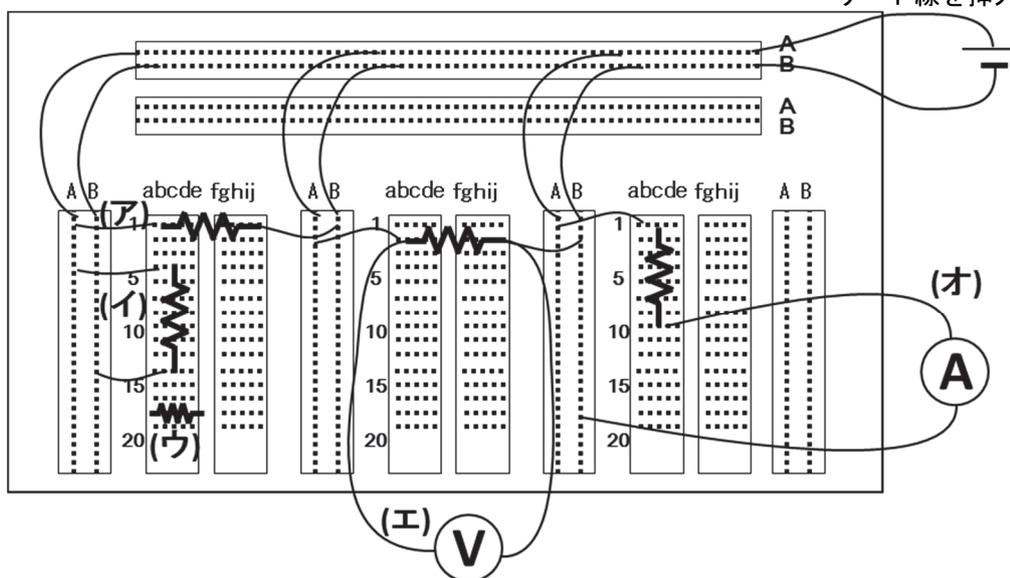
基板上に電子部品を差しこむ多数の穴があり、その間が電氣的に繋がれている回路試作用基板。ここではハンダ着が不要な無ハンダ形を使う。ブレッドボードは各種の規格があり決まった配線方法があるわけではないが、複雑な回路を作るには自分なりの配線方法を決めて規則的に配線するのが良い。

### [ブレッドボードの取扱い方法]

1. 電源 SW (スイッチ) OFF、或いは電源を外した状態であることを確認してから配線を行う。
2. 配線を完成させたら、もう一度、配線を確認する。その後 SW を ON にする。
3. 回路の変更や修正を行うときは、必ず一端、電源を OFF にするか電源をはずすこと



ボード上の穴は、図中の矢印のように縦または横に電氣的に接続されている。A, B と書かれた列(行)は同じ列(行)が繋がっており、主に電源・アース (GND) の接続に用いる。a-e, f-j の列は a~e, f~j が接続され、異なる行は絶縁されている。下図のように、この領域に抵抗等リード線を差込み、A, B 列から電源を供給すると分かりやすい。赤のガイドラインがついたラインを+側、青を一側にすると分かりやすい。差込む穴同士の接続関係を良く考えながらリード線を挿入すること。



抵抗に電流を流し、電圧と電流を測定する場合を例にブレッドボードの配線を説明する。抵抗を、(ア)や(イ)の様に、ボード内で互いに接続されていない2つの穴に差し込む。(ウ)のようにボード内で接続された穴に刺した場合は、ボード内でショートされているので意味がない。電圧の測定は(エ)のように抵抗に並列に電圧計を繋ぐ。電流の測定は(オ)の様に、回路の一部を切って、抵抗と直列に電流計を繋ぐ。図では分かり易いよう配線を曲線で描いたが、配線はできるだけ直線で縦か横方向に結ぶと分かり易い。

図 4 ブレッドボードの構造と配線方法

### 3 抵抗と豆電球の電圧・電流特性

実験を始める直前に初めて、このページを開いた諸君！君たちは考え違いをしている。パリ・ダカール・ラリーに参加するチームが自分たちの自動車が走るコースを事前に検討しないまま、ぶっつけ本番で出走し、途中で道に迷ったとしたら、観客から馬鹿にされるだけだろう。君たちはそれと同じだ。実験の途中で馬鹿な間違いをしても回りの人々は君に同情してはくれない。

実験にとりかかる前に、必ず実験の概略を把握すること。分からないことがあるなら、実習室に用意している参考書、図書室にある関連文献等を調べ、疑問を無くしておいてもらいたい。それでも分からなければ指導教員に質問して貰いたい。君たちは大学生だ。これらの努力を自主的にやることを通じて、君たちは自力で成長する方法を身につけることができる。

#### 3.1 実験のパートナー

単独で行う実験のときでも学生二人が隣り合わせに座り、必要があれば何時でも互いに力が合わせられるような状況を作ること。特別に指示された場合を除いては、一人一人が独立に実験をすることになる。しかし、実験の途中でパートナーと実験結果をつき合わせて意見を交換することは、実験課題についての理解を深める上で非常に有効である。ただし、自分の頭で考えることを放棄し、パートナーの意見を無批判に受け入れることは、成長するチャンスを自ら放棄する行為である。このような受け身の立場に陥ることは避けてもらいたい。

#### 3.2 目的

- ・抵抗の電圧・電流特性を学ぶ。
- ・豆電球の電圧・電流特性を学ぶ。

#### 3.3 実験手順

##### 3.3.1 実験ノート

この章で示された実験の途中経過および結果は実験ノートに記録しておくこと。諸君にとっては初めての実験ノート作成であるが、作成に当たっての注意点は下記の通りである：

- ・実験ノートは、君たちがこの実験で何をしたのか、どんな結果を得たのか、具体的に分かるような記録でなければならない。簡潔なものであってもかまわないが、この科目の指導教員、および1年後の君自身にも理解できるような内容であることが必要だ。大部分の実験は複数の部分に分かれる。たとえば、電源電圧の測定、負荷抵抗の値の測定、電源と負荷抵抗の配線等々。これら個々の部分にはそれにふさわしい見出しをノートに書き込んでから、その部分が始めること。実験が一通り終わってから、ノートの記録を整理するのではない。
- ・実験ノートには回路図を書きこみ、君たちがした測定、配線等について十分な情報を記録すること。回路図のそれぞれの部分に測定値、たとえばA点とB点の開の電圧はどれだけか、また抵抗  $R$  に流れる電流はどれだけか、等を記入しておくことは、この種の実験を分かりやすく記録する方法である。
- ・電圧・電流特性を一目で見するのに良い方法は、測定データをグラフに表すことである。グラフで表すと測定データが理解しやすい場合は、測定終了後すぐに、あるいは測定している途中であっても、グラフを書き始めるのがよい。測定データは表の形式で整理し、グラフは君たちの実験ノート（5 mm方眼）に直接書き込むこと。1 mm方眼紙にきれいに画く必要はない。また、パソコンを使ってグラフを画くのは（この科目に関する限り）生産的ではない。
- ・実験の途中で、何かアイデア、疑問、解釈、等が生まれたら、その場で直ちに、実験ノートに書き込むこと。
- ・測定データが物理の理論に合致するかどうか検証するのに十分な精度があるかどうか、もし精度が十分でなければ、どうすれば良いデータが得られるか考えてみよう。テスターの精度はおよそ±5%であり、これに読みとり誤差が加えられる。

##### 3.3.2 準備作業

テスター付属のテストリードは、あまり使い勝手が良くない。テストリード先端のテストピンを絶縁カバーから取外し、その直後でリード線から

切り放す。テストピンの代わりにミノムシクリップを付ける。

ミノムシクリップの絶縁カバーにリード線を通す（絶縁カバーの先端とリード線の先端が同じ向きであること）。ワイヤストリッパーを使って、リード線先端のビニール被覆を6～7mm除去し、露出した芯線を指先でねじる。実験ノートの端をミノムシクリップでくわえて固定し、これからの作業をしやすくする。図5の上図のようにミノムシクリップ後端の穴にリード線先端を通し、また後端のツメでリード線のビニール被覆を固定する。次に、図5の下図のようにミノムシクリップ後端とリード線先端とを半田付けする。

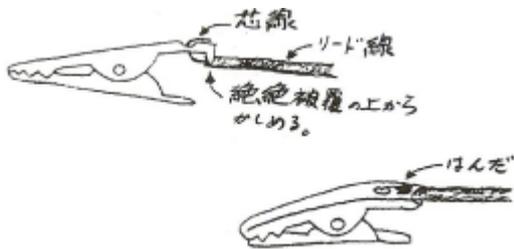


図5: テスターのテストリード先端の加工

二本のテストリード先端の加工が終わったら、テストリードをテスターに差し込み、ミノムシクリップを互いにかませあう。テスターを $\times 1\Omega$ レンジにして、抵抗値のゼロ合わせをする。ゼロ合わせが困難であれば、半田付けができていないので、もう一度半田付けをやり直す。ゼロ合わせが簡単にできたとしても、安心してはいけない。ミノムシクリップを互いにかませあった状態で、フニクリップ直後のリード線をつまみ、左右に動かしてみる。このとき、テスターの指針がふらふら動き、ゼロ位置に安定して留まっていないようなら、しっかり半田付けができていない。もう一度半田付けをやり直す<sup>1</sup>。

<sup>1</sup> 半田付け一つをとっても、このようなチェックを繰り返す、確実な半田付けが出来ているかどうかを確認することが大事である。通信衛星に載せる機器の場合、半田付けの箇所も多く、また、打ち上げ後の故障は致命的であるから、個々の作業を確実にすることはとりわけ重要である。

実験セットの中の抵抗について、カラーコードによって抵抗値を読みとり、小→大の順に表の形に整理して実験ノートに記入せよ。また、テスターを使ってそれぞれの抵抗値を実測せよ<sup>2</sup>。カラーコードに示された値と測定した抵抗値を比べ、抵抗とテスターの許容誤差から予測される範囲内で両者の値が一致するかどうか検討せよ。

### 3.3.3 その他の準備

抵抗や豆電球の電圧・電流特性を測るには、もう少し準備作業が必要である。

4本の単3電池を、図6の電池ケースに入れ約6Vの電圧を発生するバッテリー・パックを作る。電池ケースには006Pと呼ばれる9V電池と互換性がある+と-の端子が付いているので、右図のコネクタ付ケーブルを使って回路に接続する。尚、電池ケースにはスイッチは付いていないので、コネクタの抜き差しでON/OFFを行う。

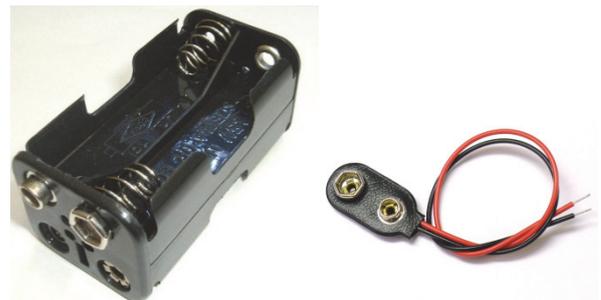


図6: 電池ケースと接続用コネクタ

つぎに、長さ8cm程度のビニール線で両端の被覆1cmはがしたものを2本用意し、6V用豆電球の口金部2カ所に半田付けする。半田付けする箇所的一方は、豆電球の口金底部中央の突起部であり、半田メッキがされている。もう一方は、豆電球のガラスと口金の接している部分で1カ所だけ半田付けされている部分である。

実験セットの中に、両端にミノムシクリップが付いているリード線が入っている。これは簡易な配線材料としても便利に使えるし、簡単なスイッチとしても使える。実際の使用に当たっては、こ

<sup>2</sup> 抵抗を測定するとき、テスターのゼロ調整（2本のテストリードが接触しないようにしたときの、指針の位置がメーターの左端にくるようにする）と抵抗値ゼロ調整（2本のテストリードをくっつけたときの指針の位置がメーターの右端にくるようにする）をきちんとしないと、測定が正確に行えないことに注意せよ。

のような既製品を頭から信用してはいけ  
ない。ワニ口クリップをテスターのリード線に半田  
付けした場合と同様のやり方で、ミノムシクリ  
ップとリード線との接触を確かめよ。

### 3.3.4 実験1：抵抗の電圧・電流特性

図7は抵抗の電圧・電流特性を調べるための回  
路である。この図で **A** と書いてあるのがテスタ  
ーである。ここでテスターは直流電流 **25 mA** を  
測定するレンジに設定されている。抵抗の一端と  
バッテリー・パックのマイナス端をクリップ・リ  
ードでつなぎ、他端にはテスター・リードのマイ  
ナス端を接続する。テスター・リードのプラス端  
をバッテリー・パックのどの電極に接続するか  
で、抵抗にかかる電圧を **1.5 V** から **6 V** まで、  
**1.5 V** 刻みで変えることが出来る<sup>3</sup>。

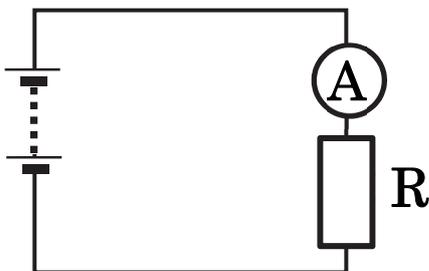


図7 抵抗の電圧・電流特性の測定

**【問】** 電源電圧が **6 V**、テスターの電流レンジ  
が直流 **25 mA** であるとする<sup>4</sup>。手持ちの抵抗のど  
れを使えば、電源電圧が最大の時でも、直流電流  
値がこの範囲に収まるか？テキストを読み進める  
前に、どの抵抗を選ぶべきか考え、選択方法と選  
択した抵抗値 **R** を実験ノートに記録せよ。

**【答】** この問題についての標準的な解答方法は  
次の通りである。（ただし、空白の部分には自分  
で答えを記入し、選択問題は○で囲め。）電圧 **6V**  
で電流 **25mA** を流すにはオームの法則  $V = IR$  よ

$$\text{り、 } R = \frac{6V}{0.025A} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

<sup>3</sup> 乾電池には、マンガン乾電池、アルカリ乾電  
池、リチウム乾電池等いくつかの種類があるが、実  
験セットにはアルカリ電池を準備した。この電池は  
新しい状態で、普通 **1.6 V** 近くの出力電圧かおる  
が、ここでは電池1個あたり、**1.5 V** として記述し  
た。

ただし、ここで求めた抵抗値は、実際に使う抵  
抗値の下限と考えなければならない。上に求めた  
抵抗値を上回り、かつ一番近い値を持つ手持ちの  
抵抗は、                      $\Omega$  である。しかし、実際には、抵抗値以外に抵抗の定格消費電力を考慮する  
必要がある。この抵抗に **6 V** の電池をつないだと  
きの消費電力は  $W = VI = \frac{V^2}{R} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$   
となる。この抵抗の定格消費電力は                      **W**  
であるが、上で求めた消費電力はこれを {上回  
る、下回る} ので抵抗が焼損する恐れは {ある、  
ない}。すなわち、電圧・電流特性を求めると  
我々が使える抵抗は、実験セットの中では  
                      $\Omega$  で                      **W** の抵抗と  
いうことになる。

**【課題】** バッテリーパックから取り出せる4種  
類の電圧をテスターで測り、実験ノートに記録せ  
よ。この4種類の電圧を君が選んだ抵抗にかけた  
ときに流れる電流を測定し、実験ノートに電圧・  
電流特性として記録せよ。抵抗の向きを逆にし  
たときの電圧・電流特性を測定し実験ノートに記  
録せよ。抵抗を逆向きにしたときの電圧、電流を  
 $-V$ 、 $-I$  とし、最初の電圧・電流特性と合わせ、  
横軸を **I**、縦軸を **V** とするグラフをかけ。オーム  
の法則によれば、電圧・電流特性は直線になるは  
ずであるが、君が求めた測定点はおおむね直線状  
になっているか？測定点をもっとも良く近似する  
直線をグラフに記入せよ。求めた直線は原点(0,0)  
を通過するか？この直線の傾きはオームの法則に  
よれば抵抗値 **R** になるはずだが、求めた直線の  
傾きから推定した抵抗値 **R** はいくらか？推定し  
た抵抗値はカラーコードによる値とどの程度一  
致するか？またテスターで求めた値とはどの程度  
一致するか？

上の課題を注意深く実行した人は、電圧・電流  
特性の測定データが系統的な誤差を含んでいるこ  
とに気づいたことと思う。この系統誤差は主とし

<sup>4</sup> テスターを流れる直流電流が **250 mA** を大幅  
に上回ると、テスター内部の抵抗やヒューズが破損  
する。テスターを直流電流測定モードにし、テスト  
リードのプラスとマイナスの両端子をそれぞれ電池  
のプラスとマイナスの端子に接続すると何か起き  
るか。（実際に接続してはいけない!）

て、図 7 において電流計  $A$  が理想的（内部抵抗がゼロ）ではないことに起因<sup>5</sup>している。ここで使っているテスターで直流電流を測定する時、指針がフルスケール振れるためにはどの電流レンジでも 250 mV 電圧が降下する。したがって、直流 25 mA レンジでのテスターの内部抵抗  $R_{int}$  は、

$$R_{int} = \frac{250\text{mV}}{25\text{mA}} = 10\Omega$$

となる。図 7 において抵抗  $R$  にかかる電圧は、電源電圧そのものではなく、テスターの内部抵抗  $R_{int}$  による電圧降下を差し引いたものである。

### 3.3.5 実験 2：豆電球の電圧・電流特性

上の実験と同様に、豆電球の電圧・電流特性を測定し、電圧・電流特性のグラフを描け。このグラフはオームの法則に従っているか？従っていないければその理由を考えなさい。また、豆電球の電圧・電流特性は電流の向きに依存するか？

## 4 発光ダイオードと乾電池の電圧・電流特性

この課題の後半は、手持ちの部品、装置だけでは不足するので、共同実験者と部品、装置を持ち寄って回路を組み立てる。電圧・電流特性は共同で測定するが、そのあとのデータ解析は個人で行う。測定中はもちろんだが、データ解析中にも相互討論を活発にしてもらいたい。

### 4.1 目的

- ・電圧分割回路 (voltage divider) を理解する。
- ・発光ダイオードの電圧・電流特性を調べる。
- ・単 3 電池の電圧・電流特性を調べる。

### 4.2 背景

電圧分割回路は直流回路でよく使われる。その基本形を図 8 に示す。 $V_{in}$  は電圧分割回路への入力電圧、 $V_{out}$  は出力電圧である。電圧分割回路の出力電圧  $V_{out}$  は抵抗  $R_1$  と  $R_2$  の比で決まる。出力電流  $I_{out}$  が無視できるほど小さい<sup>6</sup>と仮定する。キルヒホフの定理より（電池→ $R_1$ → $R_2$ →電池）の向きに閉回路を一周すると電位差がゼロにならないので、 $V_{in} = IR_1 + IR_2$  が成り立つ。

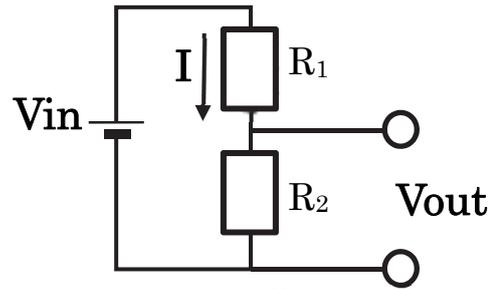


図 8: 電圧分割回路の基本

この式を電流  $I$  について解き

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

を得る。最後に出力電圧  $V_{out}$  は

$$V_{out} = IR_2 = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

式(4)の第 3 辺中の比  $R_2/(R_1 + R_2)$  は、抵抗  $R_1$  と  $R_2$  の比に応じてゼロから 1 まで変化する。すなわち出力電圧  $V_{out}$  はゼロから  $V_{in}$  まで変化する。

【問】電圧 6 V の電池から 4 V の電圧を取り出したい。手持ちの抵抗を組み合わせる電圧分割回路を考え、回路図を描け。

電圧分割回路によく使われる部品に可変抵抗がある。ラジオ、テレビなどの音量調節回路によく使われるので、ボリュームと呼ぶ人も多い。図 9 に示すように、可変抵抗の本体はベークライトの絶縁基板に黒鉛粉末を塗ったもので、この炭素膜面を金属片が接触しながら回転する。炭素膜面の両端から端子が出ており、中央の端子は移動する金属片（摺動接点）につながっている。

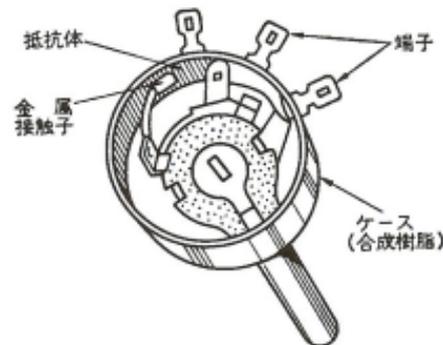


図 9: 可変抵抗の内部構造

<sup>5</sup> 副次的には電池の内部抵抗を考慮しなければならない。導線の抵抗はずっと小さく、ここで考慮する必要は

ないが、3年生の物理実験で取り上げる高温超伝導の測定では導線の抵抗も測定に影響してくる。

<sup>6</sup> 何と比べて無視できるのか？

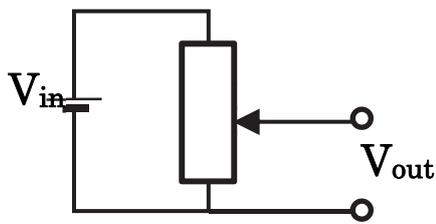


図 10 : 可変抵抗を使った電圧分割回路

図 10 は可変抵抗を使った電圧分割回路である。可変抵抗の摺動接点の位置によって、分割抵抗の比  $R_2/R_1$  が変化し、出力電圧がゼロから  $V_{in}$  まで変わる。

【問】入力電圧が  $V_{in}=3V$ 、ポテンショメータの抵抗が  $100\Omega$ 、最大許容消費電力が  $0.5W$  だと仮定する。ポテンショメータの摺動接点の位置はちょうど中央にあり、 $V_{out}/V_{in} = 0.5$  である。このとき、ポテンショメータの摺動端子とマイナス端子間を誤ってショート（短絡）した<sup>7</sup>。このとき何か起きるか考えて見よ。摺動接点の位置が図 8 の上の方へいき、 $V_{out}/V_{in} = 0.9$  のときにショートしたら、どうなるか？

#### 4.2.1 発光ダイオード

1950 年代までは、“diode”（ダイオード）という英単語は「二極（真空）管」と訳されていた。二極管は一方にだけ電流を通し、逆方向には通さない真空管である。現在では真空管はほとんど使われなくなり、半導体（トランジスタやダイオード）がエレクトロニクスの主流になった。二極管が交流を直流に変換する整流回路に使われたのと同様に、半導体ダイオードも整流回路に広く使われている。発光ダイオード（Light Emitting Diode、LED）は順方向電流を流すと赤や緑色の光を発するので、小型で効率的な光源として使われることが多い。LED は構造上、電流を流しすぎると壊れてしまうから、図 11 のように保護抵抗を直列に入れて回路を構成する。

LED の矢印の向きは電流が流れやすい方向を表す。この回路を流れる電流の最大値はダイオード電圧（ダイオードの 2 つの端子間の電圧）が例

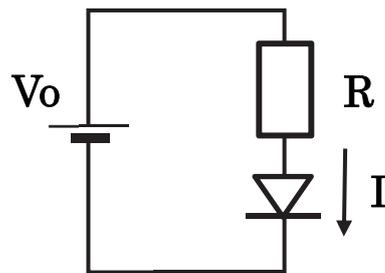


図 11: LED の駆動回路

えゼロだとしても、 $V_0/R$  である。この電流値が LED の許容電流を越えないようにすれば、大電流で LED を壊す恐れはない。実際のダイオード電圧は  $0.5\sim 2V$  の範囲にあるので、これを考慮して保護抵抗の値を決定する。

#### 4.2.2 乾電池

単 3 乾電池を 8 本直列に繋げば電圧は  $12V$  で自動車のバッテリーと同じになる。この乾電池をバッテリーの代わりに繋げば自動車を動かせるだろうか？もちろん、そんな事はできない。乾電池は出力電流が小さければ、起電力  $V_0$ （アルカリ乾電池で  $1.6V$  程度）を保持するが、負荷電流が流れると出力電圧は低下する。この電圧低下は、近似的に電池の内部抵抗で表すことができ、等価回路では図 12 のようになる。この図で  $V_0$  は理想的な（内部抵抗がゼロの）電池の起電力を表し、 $r$  は電池の内部抵抗を表す<sup>8</sup>。電流  $I$  が流れているとき、乾電池の端子電圧は  $V_0 - I \cdot r$  に低下する。

電池の内部抵抗  $r$  が大きいと、負荷電流  $I$  の増加による出力電圧の低下  $I \cdot r$  が大きい。

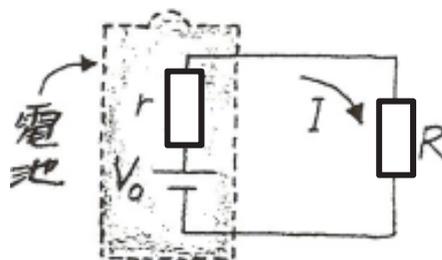


図 12: 乾電池の内部抵抗  $r$

<sup>7</sup> 実際にショートさせてはいけない。ポテンショメータの消費電力が最大許容電力を越えるため、ポテンショメータが焼損してしまう。

<sup>8</sup> 電気化学によれば、電池の内部抵抗は、図 12 に示しかようなオームの法則を満足する抵抗では表されない。図 12 は等価回路による近似である。

たとえば、自動車のエンジンを起動するときエンジン・スターターには 100 A もの電流が流れる。自動車バッテリーの電圧が 12 V であったとしても、内部抵抗が大きければ、スターターに 100 A の電流を供給出来ない。電圧 12 V で電流 100 A を供給してエンジン・スターターを回すにはバッテリーの内部抵抗  $r$  が  $(100\text{A}) \times r \ll 12\text{V}$  の条件を満たす必要がある。すなわち、 $r \ll 0.12\ \Omega$  でなければならない。大電流負荷にたえ、かつ内部抵抗がこのような小さな電池は、大型の鉛蓄電池以外にはないので、自動車バッテリーには鉛蓄電池が使われている。<sup>9</sup>

【問】懐中電灯の豆電球に電流を 0.25 A 流し点灯した。このとき、電池の電圧降下が 0.15 V 以下であるとすれば、電池の内部抵抗は最大でもどれだけか？

### 4.3 実験手順

#### 4.3.1 実験 1 : LED の電圧・電流特性

この実験ではテスターを 2 台使うので、自分の手持ちの道具だけでは不足する。二人の道具を持ち寄って実験することになるが、共同で行うのは測定だけである。測定データを自分の実験ノートに記録しグラフをかくことは各自が独立に行う。図 13 は、LED の電圧・電流特性を測定するための回路である。この回路では乾電池と可変抵抗を使って可変電圧電源を構成している。また、回路図の  $A$  と  $V$  は電流計と電圧計であり、テスターを使って、電流、電圧を測定することを表している。

図 13 では抵抗  $R$  の値を記入していない。この抵抗  $R$  は、可変抵抗の摺動端子が一番上側、すなわち、可変電圧電源の出力電圧が 6.0 V のときにでも LED を流れる電流が規格で決められた上限を越えないようにするために挿入されている。

「規格で決められた上限の電流」は最大許容順方向電流と呼ばれるもので、LED の品番毎に異なるが、今回の実習で用いる LED では 20 mA 程度である。

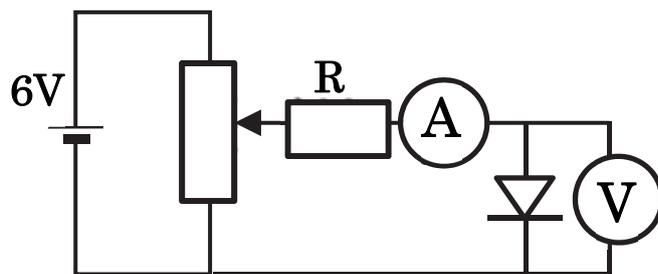


図 13 : LED の電流・電圧特性の測定

るが、今回の実習で用いる LED では 20 mA 程度である。

図 13 において可変抵抗の摺動端子が一番上側にあるとき、LED を流れる電流  $I$  は

$$I = \frac{6.0 - V_{LED}}{R}$$

で与えられる。 $V_{LED}$  は LED の両端の電圧で 2~3V 程度である。この  $I$  が最大許容順方向電流  $I_F$  を越えないように電流制限抵抗の抵抗値を決めればよいのだから、 $V_{LED} = 2\text{V}$  とすれば

$$\frac{6.0 - 2.0}{R} \leq I_F, \text{ 即ち } R \geq \frac{4.0}{I_F}$$

を満足するように  $R$  を決める。 $I_F = 20\text{ mA}$  とすれば、上式から電流制限抵抗  $R$  は 200  $\Omega$  より大きければよいことが分かる。ただし、 $R$  があまり大きすぎると LED に流れる電流が少なくなり、発光強度が低下する。

図 13 において、電流計  $A$  で測定した電流は、LED と電圧計  $V$  に流れる電流の和である。電圧計  $V$  に流れる電流は通常無視し回路の動作を考えるが、これは電圧計の内部抵抗を無限大と仮定したことになる。テスターの内部抵抗は測定レンジの電圧  $V$  に比例し、その係数は数  $\text{k}\Omega/\text{V}$  程度である<sup>10</sup>。フルスケール 10V の直流電圧計として使うときは、この数値の 10 倍で数十  $\text{k}\Omega$  程度になる。どの電圧レンジにおいても指針が最大電圧を指すときに流れる電流は数百  $\mu\text{A}$  程度であり、電流の測定誤差をこれより小さくするには、回路を工夫する必要がある。

<sup>9</sup> 居間のエアコンのスイッチを入れたとき、一瞬電灯が暗くなるのに気づいた人も多いだろう。これはエアコン起動時に大電流が一過的に流れるため、家庭用電灯線の電圧が一瞬低下するためである。

<sup>10</sup> テスターによっては、メーターに「DC 4k  $\Omega/\text{V}$ 、AC 4k  $\Omega/\text{V}$ 」等とかがかかれている場合がある。

【問】電圧計と電流計の接続を変え、電流計はダイオード電流だけを測定し、電圧計はダイオードと電流計にかかる電圧の和を測定する回路を図に書け。

多分、皆さんは図 13 の電流計の位置を変えた回路を考えたと思う。その回路では電流は正確に測れるが、電流計の内部抵抗による電圧降下が電圧測定での誤差となる。この電圧降下はどの電流レンジにおいてもメーターの振れに比例し、指針が最大電流を指すときは数百 mV 程度である<sup>11</sup>。ここで考えた回路は小さなダイオード電流を正確に測定できるので、電流が小さいときはこの回路が有利である。一方、電流が大きな領域では、図 13 の回路の方が有利である。

【課題】 許容規格内でダイオード電流  $I$  を出来るだけ大きくとれるよう、電流制限抵抗  $R$  を調節する。ポテンショメーターの摺動端子の位置を下端から上端まで変え、そのときのダイオード電圧  $V$  とダイオード電流  $I$  を測定し実験ノートに記録せよ。ダイオード電圧  $V$ 、電流  $I$  を出来るだけ正確に測定できるように、テスターを最適の測定レンジに設定せよ。また、測定回路についても、図 13 の回路と上の【問】で考えた回路のどちらが適しているか判断し、その理由を実験ノートに記載せよ。ダイオードを逆向きにしたときの電圧、電流を  $-V$ 、 $-I$  とし、最初の電圧・電流特性と合わせ、横軸を  $I$ 、縦軸を  $V$  とするグラフをかけ。ダイオードの電圧・電流特性について関連文献を調べ、測定した電圧・電流特性と比較せよ。

#### 4.3.2 実験 2 : アルカリ単 3 電池の内部抵抗

この課題でも 2 台のテスターを組み合わせで測定する。共同実験者と協力して測定回路を組み立ててもらいたい。

電池の内部抵抗  $r$  は、原理的には図 14 の回路でスイッチを開閉したときの電圧、電流を測定すれば求めることができる。

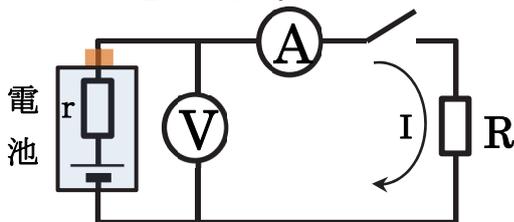


図 14: 電池の内部抵抗  $r$  の測定 (その 1)

まず電流ゼロでの端子電圧  $V_0$  を測定し、次にスイッチを閉じ電流  $I$  が流れたときの電圧  $V$  を測定する。電流  $I$  と電圧降下  $V_0 - V$  より次式で、

$$V = V_0 - I \cdot r$$

$$r = \frac{V_0 - V}{I}$$

電池の内部抵抗  $r$  が計算できる。しかし、電池の電圧を測定するには、電圧計のレンジを 1.5 DCV 以上にする必要があり、電圧降下が 10mV 程度しかなければ測定することは困難である。図 14 の回路ではなく、何かうまい工夫をした回路で微少な電圧降下を正確に測ることを考えてみよう。

図 15 の回路は上記の困難を解決し、微少な電圧降下を正確に測ることができる。基本的なアイデアは、大きな電池電圧  $V_0$  をキャンセルし、電圧計の高感度レンジを使って電圧降下だけを測定しようというものである。尚、実際の測定ではスイッチは使わず、 $R_2$  の配線を付け外しすることで電流を ON/OFF する。

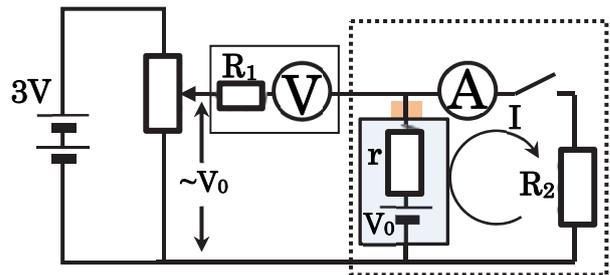


図 15: 電池の内部抵抗  $r$  の測定 (その 2)

右側の破線で囲まれた回路に注目して欲しい。この回路は図 14 と全く同じで、中にある電池の内部抵抗  $r$  を測定する。左側の残りの回路全体で高精度な電圧計として働く。左端の 2 個の電池は基準電源で、これを可変抵抗で分圧し  $V_0$  付近電圧を作り基準電圧とする。抵抗  $R_1$  は電圧計の内部抵抗を表しているので実際には配線しない。右端の抵抗  $R_2$  が被測定電池から電流  $I$  を引き出すための負荷抵抗である。

図 15 のスイッチが開いた状態で、可変抵抗の摺動接点が一番上にあると、電圧計の読みはほぼ 1.5 V になっている<sup>12</sup>。可変抵抗を調節し、電圧計の読みをほぼゼロにして電圧計のレンジを最高

<sup>11</sup> どのように考えたらこのことが分かるか?

<sup>12</sup> 電圧計のレンジは 10V にしておくこと。

感度に変える。この状態で可変抵抗をさらに調節し電圧計の読みをゼロにする。電圧計の内部抵抗は数  $k\Omega$  であるが、電圧計両端の電位差がゼロなので電圧計を通る電流もゼロである。

スイッチを閉じると、負荷抵抗  $R_2$  に電流  $I$  が流れ、測定する電池の電圧は  $I \cdot r$  だけ低下して  $V_0 - I \cdot r$  となり<sup>13</sup>、電圧計の読みは  $I \cdot r$  になる。基準電圧で  $V_0$  がキャンセルされるので、電圧降下  $I \cdot r$  を電圧計の最高感度レンジで測定できる。

この方法のエッセンスは、可変抵抗を調節して作った基準電圧を  $V_0$  に一致させ、基準電位と被測定電池の電圧との差だけを高感度に測定することである。このように基準信号との差だけを検出して高感度に測定する方法は、微小な信号を正確に測定するのにしばしば用いられている。

**【課題】** 負荷抵抗  $R$  を変えて電流  $I$  を変化させ、そのときの電圧降下を測定し、内部抵抗  $r$  を求めよ。負荷抵抗  $R$  は大きすぎると、電圧降下が小さくテスターの最高感度レンジでも測定が正確に行えない。最初は  $R$  を大きくし、だんだん小さくして、電圧降下が容易に測れるまで負荷抵抗  $R$  を小さくすることが大事である。負荷電流  $I$  が測定可能範囲を越える場合は、電流計を取り外し代わりに  $R_2$  との両端の電圧を計り  $I$  を計算せよ。尚、負荷抵抗が小さすぎると、電流  $I$  が電池の許容範囲を超え、電圧が不安定になることがある。

**【問】** 種々の負荷電流  $I$  にたいして、脚注で述べた条件、すなわち「電圧計を通る電流  $i$  が小さく摺動端子の電位変動量も無視できるほど小さい」という条件は満足されているか？負荷電流  $I$  を変化させても、内部抵抗  $r$  の値は変化しないか？もし抵抗  $r$  の値が一定なら、電池の内部抵抗をオームの法則に従う抵抗とみなしても良いが、はたしてそうになっているか？

#### 4.3.3 電圧分割回路を使った電圧源の内部抵抗

これまでの実験で、電圧分割回路を使った可変電圧源を用いてきた。この回路は全体としてみると1つの電源であるが、この電源の内部抵抗はどう決まるのだろうか？一般に電圧分割抵抗は電池の内部抵抗より充分大きいので、電源の内部抵抗は直列接続される電圧分割抵抗（図16の  $R_1$ ）

<sup>13</sup> このとき電圧計を通る電流  $i$  は、両端子間の電位差が  $I \cdot r$  であるから  $i = I \cdot r / R_1$  になる。この電流  $i$  の影響

で決まると考えられるが、この時に負荷と並列に繋がる下側の抵抗 ( $R_2$ ) は影響しないだろうか？

図16の回路を作製し、可変電圧源の内部抵抗を測定してみよう。点線で囲った部分全体を内部抵抗のある仮想電源と考え、内部抵抗を測定する。この仮想電源の内部抵抗は大きいので前節の図14の回路でも充分測定できる。

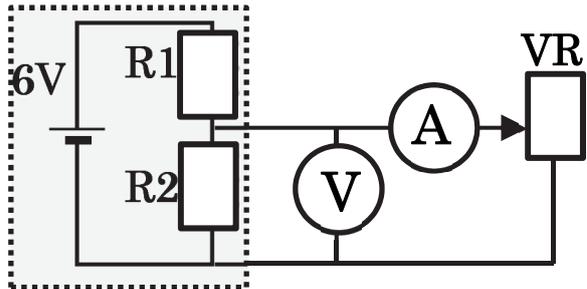


図16：可変電圧源の内部抵抗測定

VR は可変抵抗の中央と、両端のどちらか一方だけを使い抵抗値を変化させる。100  $\Omega$  程度の同一の抵抗を  $R_1, R_2$  として測定を行う。まず VR を外して  $I=0$  での電圧  $V$  を測定する。次に VR を抵抗最大の状態に設定して回路につなぎ電圧  $V$ 、電流  $I$  を測定する。以後、VR の抵抗値を変えて電流を変化させ同様な測定を続ける。電流値がほぼ等間隔に並ぶように VR の抵抗値を調整すれば、きれいな測定結果が得られる。

電流を横軸、縦軸に電圧を取ってグラフを作成しなさい。グラフが直線であれば内部抵抗による等価回路は良い近似になっているが、曲線であれば良い近似とはいえない。この擬似電源に対して内部抵抗を用いた等価回路は良い近似となっているか？良い近似になっているならば、グラフの傾きから電源の内部抵抗  $r$  を計算しなさい。

次に、 $R_1$  を最初の倍程度にして同様な測定を行い、更に  $R_1$  を最初の半分程度の場合について測定しなさい。3つの  $R_1$  に対する結果を1枚のグラフにまとめ、内部抵抗  $r$  及び  $V_0$ （電流零での出力電圧）と  $R_1, R_2$  の関係について考察しなさい。

で、ポテンショメーターの摺動端子の電位も変動するが、電流が小さいため変動は無視できるほど小さい。

## 5 デジタル回路の基礎

### 5.1 目的

デジタル回路は、今日広く使われている。テレビのリモコン、目ざまし時計、ワープロ、パソコン、…これらの装置にはデジタル IC

(integrated circuit、集積回路)が使われているが、この章では、デジタル回路のもっとも基本となる「ゲート」について簡単な実験をし、デジタル論理回路について学ぶ。

### 5.2 背景

デジタル回路は、回路中の信号線の電圧が“1”と“0”の二つしかない世界である。“1”とは信号線の電圧が「あるレベルより高い状態」、 “0”とは「あるレベルより低い状態」のことである。具体的に例をあげて考えよう。いま仮に、電源電圧 5 V で動作するデジタル IC があり、その IC は入力ピンと出力ピンを何本かずつ持っているとして仮定する。入力ピンに 3 V から 5 V までの電圧が加えられると、この IC は“1”の信号が入力された場合の動作をし、入力端子に 0 V から 2 V までの電圧が加えられると、この IC は“0”の信号が入力された場合の動作をする<sup>14</sup>。IC の動作結果は出力ピンに“1”または“0”の電圧レベルとして現れる。入力ピンに加えられる電圧が「許容幅の範囲内」ならば、どんな電圧でも（絶えず変化したり雑音電圧が混っていても）正確に“1”または“0”が入力されたものとしてこの IC は動作する。

この IC の動作は、かなりおおざっぱに見えるが、“1”が“0”かというデジタル回路の立場からいえば、完全に正確な動作である。アナログ回路では、精密な回路になればなるほど、ほんのわずかな信号の変化でも正確にキャッチしなければならないが、デジタル回路ではどんなに複雑・精密な回路でも、信号の判別に関しては“1”ど“0”の 2 種類だけが分かればよい。コンピュータは非常に複雑なデジタル回路の例であるが、その中で取り扱

う電気信号はこの“1”と“0”の 2 種類だけである。

デジタル回路はトランジスタやダイオードなどの素子で作ることもできるが、通常、デジタル IC を組み合わせて構成する。デジタル IC は、内部回路に使われているトランジスタの種類によって、MOS-FET (metal-oxide semiconductor field-effect transistor、モス型電界効果トランジスタ)を主体にした CMOS (complementary MOS) IC と、バイポーラ・トランジスタ (普通にトランジスタと呼ばれているもの)を主体とする TTL (transistor-transistor logic) IC に 2 大別される。デジタル IC は on-off 制御回路やコンピューター回路に広く使われている。実験をする立場からは、TTL IC より CMOS IC の方が使いやすい。TTL IC は消費電流が多い上に、電源電圧は正確に 5 V (±5~10%) であることが要求され、さらに“1”の電圧範囲 (2.4 - 5.0 V) と“0”の電圧範囲 (0 - 0.8 V) が、電源電圧に対して非対称という欠点がある。これに対し CMOS IC は、電源電圧が 3 ~ 6 V の範囲にあれば動作し、“1”レベルは電源電圧の 2/3 以上、“0”レベルは 1/3 以下と対称的で、消費電流も少ない。CMOS IC が出現した当初は、動作速度が遅く、静電気の影響で入力端子部の内部回路が破壊されたり、ラッチアップといって内部回路の自己短絡現象が起きるなどいろいろ問題があったが、現在では改良・発達を遂げ、TTL よりはるかに広く実用されるまでになった。上記の理由により、この実験ではもっぱら CMOS IC を使うことにする。

IC はその中に入っている半導体素子の個数によって、SSI (small-scale integrated)、MSI (medium-scale integrated)、LSI (large-scale integrated)、VLSI (very large-scale integrated) のように名称が異なる。マイクロコンピュータの頭脳として働く CPU (central processing unit) は VLSI の代表選手であるが、

<sup>14</sup> 一般にデジタル IC が“0”と認識する電圧範囲と“1”と認識する電圧範囲の間にはどちらとも認識しな

い電圧範囲が存在する。このような電圧が入力されるとデジタル IC は予測不能の動作をする。

実験研究者が必要に迫られて装置を手作りするときには SSI や MSI をよく使う。この実験では CMOS SSI を使い、デジタル論理回路を学ぶ。デジタル回路の基本的な回路要素を「ゲート」という。これには何種類かがあるが、どれも、1本または数本の入力ピンと1本の出力ピンを持ち、入力ピンに加えられた「1」または「0」の組み合わせによって、出力ピンの「1」または「0」の状態が決定される。これらの中でもっとも簡単なゲートは図17に示したインバータである。

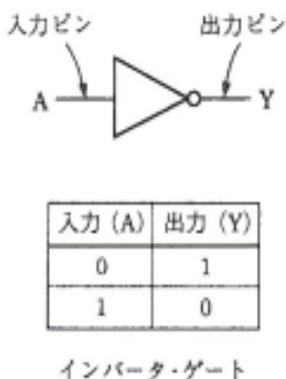


図17: 最も簡単なゲート;インバータ

図中で使われているシンボル(記号)はMIL(ミル)記号と呼ばれ、ゲートの種類によっていくつかのシンボルを使い分ける。インバータは先端にマルのついた三角形で表され、入力が「1」なら出力は「0」、入力が「0」なら出力が「1」、つまり入力と出力が常に反対の状態になるゲートである。図17には、入力ピンと出力ピンの「1」と「0」の関係を一覧表にしたものも示してある。このような表のことを、論理表または真理値表とよぶ。

インバータと並んでもっともポピュラーなゲートは「NAND(ナンド)ゲート」である。図18に2入力NANDゲートのMIL記号と論理表を示す。パーツ屋さんには、インバータICのないことがあっても、2入力NANDゲートICが品切れのことはない。それほど、この2入力NANDゲートはポピュラーに使われている。

NANDゲートの動作を考えるには、AND(アンド)ゲートの振る舞いを見るのがよい。1個のANDゲートには複数の入力ピンと1本の出力ピンがある。ANDゲートは入力ピンに入る電圧レ

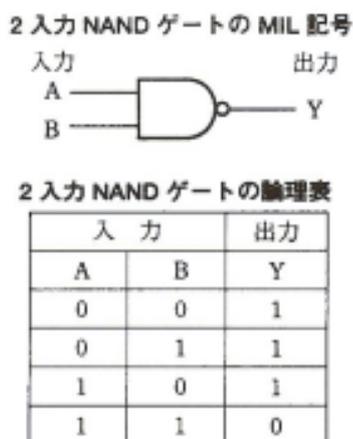


図18: 2入力NANDゲートとその論理

ベルがすべて「1」のときだけ「1」レベルを出力し、入力信号に1本でも「0」があれば、出力は「0」のままであるようなゲートである。(2入力ANDゲートの真理値表を書いて見よ。)ANDゲートの反対の動作をするのがNANDゲートであり、このゲートは入力信号が全部「1」のときだけ「0」レベルを出力する。「NAND」という名称はANDの否定(NOT)という意味から来ている。

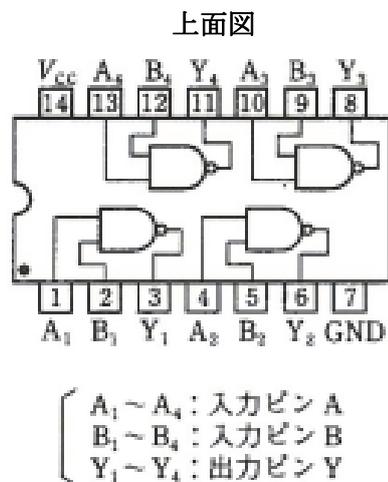


図19: 2入力NANDゲートIC:74HC00

図19は74HC00というCMOSICのピン接続図である。74HC00は、2入力NANDゲートを4個、同一パッケージの中に納めている。図は74HC00を上面から見たとき、IC内部の4個の2入力NANDゲートの入出力がICの何番ピンにつながっているかを示したものである。ピン接続図にはピン番号が付けられているが、実物のICのピンに番号が刻印されているのではない。IC上面から見て、切り欠き、ドットなど目印のすぐ

下が1番ピン、そのあと反時計回りに2番ピン、3番…というようにピンを番号で呼ぶ約束である。この約束は、アナログ IC も含め、すべての IC に共通しているから、覚えておいて損はない。IC は回路なので信号の入出力以外に回路を動作させる電源 (Vcc) と接地 (GND) 端子が必要である。通常、電源は左上、GND は右下にあり、74HC00 では GND が7番、電源 (Vcc) が14番ピンである。電源と GND を繋がないと IC 回路は全く動作しないので注意が必要である。

### 5.3 デジタル回路の基本特性の測定

74HC00 を用いてデジタル回路の基本特性を測定する。実験に用いる回路はブレッドボードを用いて構成するが、IC のピンはやや外側に開いており、ブレッドボードに差し込みにくいので、あらかじめピンを内側にたわめておくと差し込みやすい。4本直列の単3電池パックから Vcc の電圧をブレッドボードに供給して回路を動作させる。電源電圧 VCC は電池の種類や状態で若干増減するが、74HC シリーズの IC は電源電圧 2~6V の間で動作させることができるので、Vcc は 5V 付近であれば動作する。

Vcc の電圧を IC の 14 番ピンに接続し、0V 側を IC の 7 番ピンに接続すると 74HC00 は動作状態になる。ただし、IC の配線をするときには電池パックを取りはずし、74HC00 を非動作状態にしておくこと。

#### 5.3.1 実験1：2入力 NAND ゲートの入出力特性

電池パックをブレッドボードから取りはずし 74HC00 を OFF 状態にする。手持ちの 100Ω ポテンシオメーターを使って 74HC00 の 14 番ピン[Vcc]と 7 番ピン(GND)の間で Vcc の電圧分割回路を作る。74HC00 の入力ピン A1 と B1 をショートし、0V から Vcc までの電圧をこの 2 本のピンに同時に与える。このような回路を図にかけ。君が考えた回路を実際に配線した後、電池パックを IC ソケットに接続し 74HC00 を ON 状態にする。

74HC00 の入力ピン A1 と B1 に 0V から Vcc までの

範囲でさまざまな電圧を加え、出力ピン Y1 に現れる出力電圧を測定し、入力電圧の関数として出力電圧をグラフに表せ。入力電圧を少し変化させただけで、出力電圧が大きく変化するところがある。このようなところでは、測定間隔を小さくしなければきれいなグラフを書くことができない。このようにして得られたグラフが 2 入力 NAND ゲートの入出力特性を表すグラフである。

#### 5.3.2 実験2：2入力 NAND ゲートの動作

2入力NANDゲートの動作は、2本の入力ピンが両方とも“1”のときだけ、出力ピンが“0”になると規定されている。2入力NANDゲートがこの規定通り動作するかどうかを確かめるにはどんな測定をすればよいか、考えよ。本当に図 18 の論理表が成立するかどうか、確認せよ。

## 6 カウンターの作製

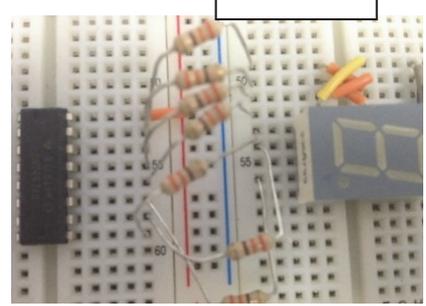
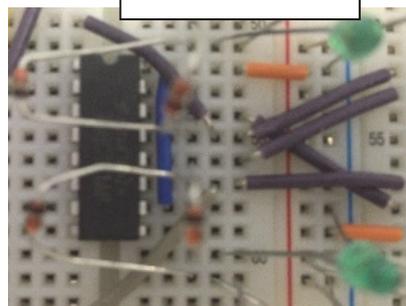
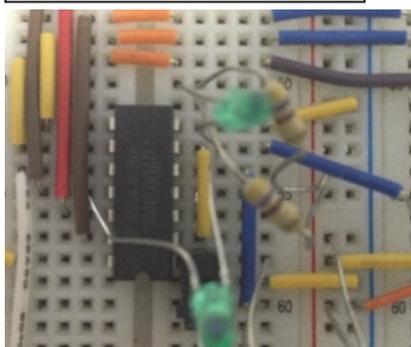
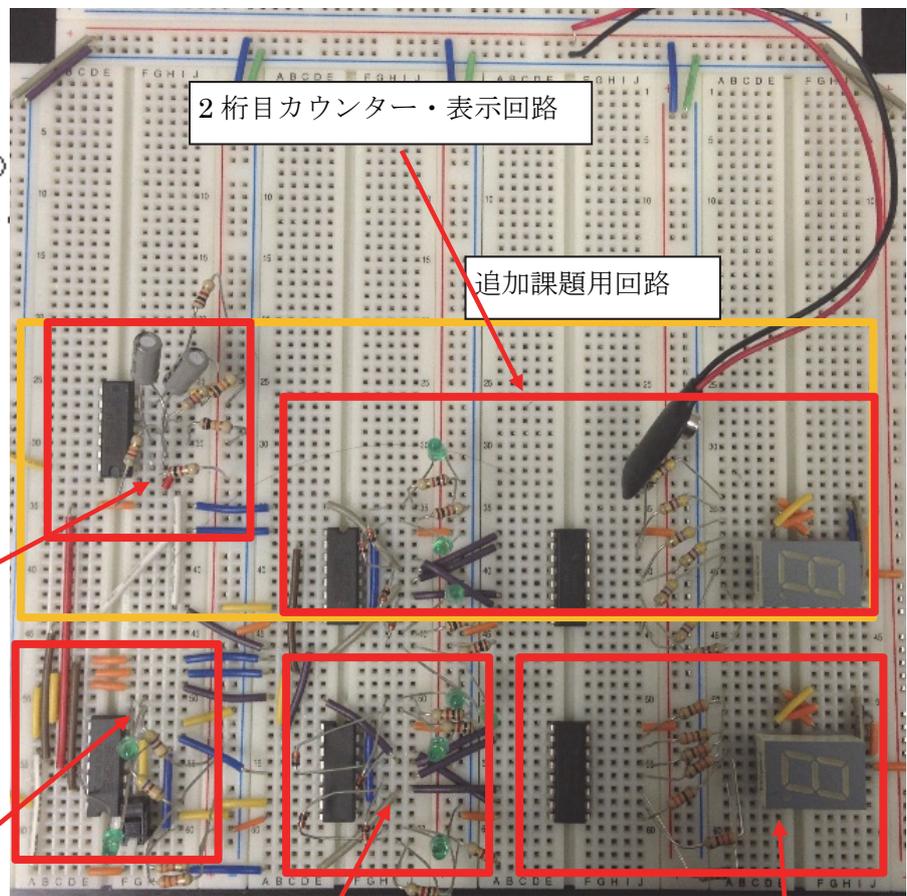
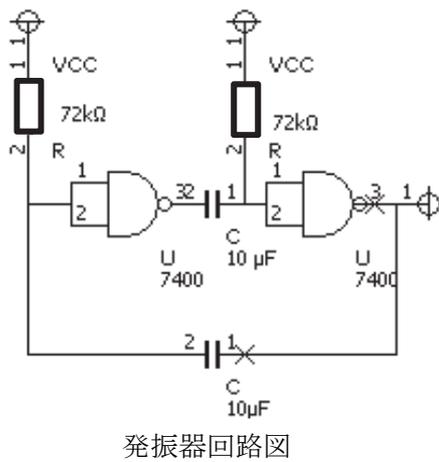
この章では、デジタル回路の応用例として簡単なカウンター回路を作成する。図 20 の写真は過去の実習で作成した回路の例である。基本の課題では、下の図のチャタリングシェーパー、カウンター回路、表示回路を組み合わせ、スイッチを押した回数を 10 進 1 桁で表示するカウンターを作製する。

時間に余裕があれば図中の追加課題用回路も作製し、2 桁目のカウンター回路と 1Hz の発振回路を追

加することで、1 秒ごとに数値が増え 60 までをカウントするタイマー作製することができる。次節から、夫々の回路の作製を進めるが、全体としてはかなり複雑な回路となるので、最初に全体の配置を良く考えてから製作を始めなさい。

今回使うブレッドボードはかなり大きいので、この写真を参考にレイアウトを決めても良いが、回路の実装はいろいろな配置が可能であるので全く違う配置を考えても良い。

図 20 カウンター回路の作成例



## 6.1 フリップフロップ回路

基本課題では、スイッチが押された回数を数えるカウンターを作製するが、スイッチは1回押しただけでも、電極の振動で何回も ON/OFF を繰り返す。このチャタリングと呼ばれる現象を防ぐため細かい ON/OFF を取り除くチャタリングシェーパー回路が必要となる。ここでは 74HC00 を使った フリップフロップと呼ばれる回路でチャタリングシェーパーを作製する。フリップフロップには様々な回路形式があるが、基本的な構成は図 21 の様に 2 つのゲートを組み合わせ、そのうちの一方だけが 1 (on) となり他方は 0 (off) になるようにしている。どちらのゲートが 1 になるかで 1 bit の情報を記憶でき、計算機のメモリーやカウンタ回路など様々なデジタル装置の基本回路である。

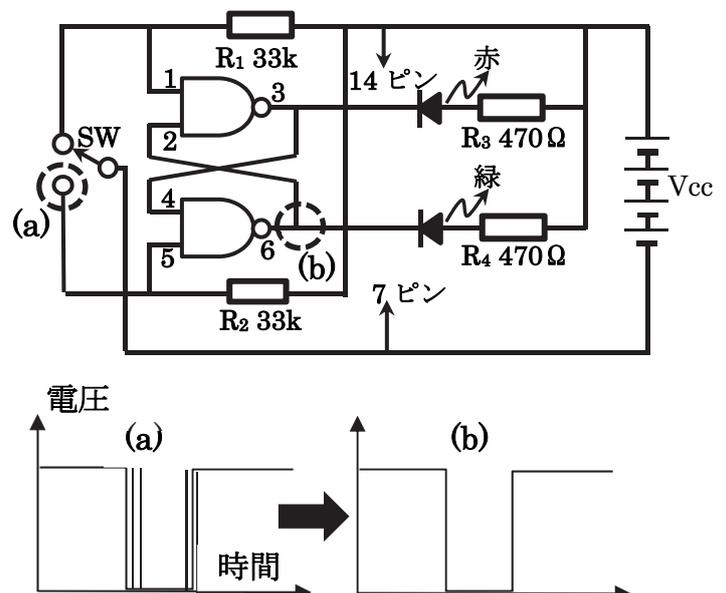
まず電池パックをはずし、全体の配置を良く考えて 74HC00 の位置を決めブレッドボードに差し込み、図 21 の回路を組み立てなさい。LED の向きを間違えないように注意し、14 ピンを Vcc、7 ピンを GND に繋ぐのを忘れないように。抵抗は指定のものが無ければ同程度の抵抗値のもので良い。通常、半分以下或いは倍以上の抵抗値でも充分動作する。この寛容さがデジタル回路の大きなメリットである。(勿論、消費電力や速度で最高性能を目指すなら設計どおりの抵抗値にする必要はある。) 最初は SW は取り付けなくて、代わりにリード線を使って IC の 1 番ピンまたは 5 番ピンをどちらか好きなほうを接地しておく。この回路を配線した後、電池パックをブレッドボードに接続し 74HC00 を ON 状態にすると、赤と緑のどちらか一方の LED が点灯するはずである。そうでなければ配線が間違っているので電池パックを取りはずし注意深く回路をチェックすること。

赤と緑のどちらか一方の LED だけが点灯した状態が実現できれば完成である。仮に赤の LED が点灯しているとしよう。このとき、緑の LED を点灯させるにはリード線を 1 番または 5 番のどちらに触れればよいか? 1 番ピンまたは 5 番ピンを一時的に接地した時に、LED の点灯状態が変わるのは何故か考えてノートに記入しなさい。ここで使う SW には 3 つの電極があり、通常はその内の 2 つがショートし

他の 1 つはオープンになっている。白いレバーを押すとこの接続が切替わる。テスターで電極間の抵抗を計りながらレバーを押してスイッチの動作を確認しノートに記入しなさい。このスイッチの動作と、前項の 1 番ピン、5 番ピンの状態と点灯する LED の関係とを考え、通常は赤 LED が点灯しスイッチのレバーを押したときだけ緑が点灯するようにスイッチの向きを考えて配線しなさい。この回路の動作は次のようになる。スイッチ (SW) の接点 (a) の電圧はスイッチの切り替えにより変化するが、切り替えた瞬間は下図 (a) のように接点の振動(チャタリング)による多数のスパイク状のノイズを含む。このノイズは人間の目では見えないが、次章のカウンター回路は正確にカウントしてしまう。一方、フリップフロップの出力 (b) は、一旦セットされるとリセットされるまで戻らないので、図 (b) のようなきれいなパルスとなり、チャタリングが除かれる。

この回路はリセット・セット・フリップフロップ (reset-set flip-flop, RS FF) と呼ばれるものであり直前に 1、5 ピンのどちらかがアースされていたかを記憶する。これはまさしく「1 ビット」のメモリーであり、コンピュータ内部で使われているスタティックメモリー (SRAM) と原理的に同じである。ちなみに、フリップフロップとは、英語でシーソーの「ギッタン、バクコン」に相当する擬音語であり、2 つのゲートのどちらかが ON になりし他方は必ず OFF になることをシーソーの動きと対比させている。

図 21 : 74HC00 を使ったフリップフロップ



## 6.2 フリップフロップを用いたカウンター

フリップフロップは、記憶回路としてよく用いられるが、カウンターとしても重要である。この章では、4個のフリップフロップを集積した74HC161というICを用いて16進1桁のカウンターを作製し、前章で作製したチャタリングシェーパー回路からのパルスをカウントする。

回路図を図22に示す。必要な回路はICの中に全部含まれており、電源、GNDの配線と1, 7, 10ピンをVccに繋ぎ1 (H:High) にするだけで動作する。2ピンのCK(クロック)端子にパルスを入力すると、入力されたパルスの数をカウントし、11から14ピンに2進数で出力する。この出力を、1の時だけLEDを点灯させて可視化すると同時に、次章で説明する表示回路に繋ぐ。ここでは前章のチャタリングシェーパーからのパルスを入力し、スイッチを押した回数をカウントする。

74HC161はT型フリップフロップ(T-FF)を4つ内蔵している。T-FFはクロック(CK)と呼ばれる入力端子を持っており、これにパルスが加えられるとT-FFの出力が反転する。

図23の左は74HC161の内部構造であり、T-FF0の出力がT-FF1の入りに繋がり、以下同様に4つのT-FFが直列に繋がっている。初段のT-FF0はICのCK入力に繋がり外部からパルスを入力する。各T-FFの出力は4つの出力端子(QA~QD)につながっている。右図は、全T-FFが0状態からスタートしCK端子に16個のパルスを順次加えた場合のQA~QDの出力を示している。外部からのCK入力はT-FF0に加わり、最初のパルスの立下りでT-FF0の出力が反転し1となる。2番目の

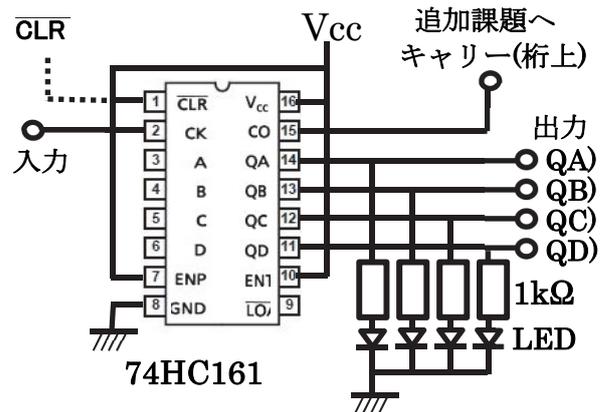


図22: フリップフロップを使ったカウンター回路

パルスでT-FF0が0に戻りT-FF1が1になる。以後同様にT-FF0の出力は1パルス毎に反転し、T-FF1は2パルス毎に反転する。4番目のパルスではT-FF1が0になり代わりにT-FF2が1、8番パルスではT-FF2が0でT-FF3が1となる。16番目のパルスで全T-FFが0となり最初の状態に戻る。IC全体では16進のカウンターになっている。4つの出力をDCBAの順に並べると、0000, 0001, ..., 1110, 1111, と変化しており、これは0から15までの数字を2進数で表したものとなっており、カウントしたパルス数を2進数で表示している。尚、図の最下行に書いた様に、16進数では0~9の数字と10~15を表すa~fの文字で0~15を表す。

図22の回路では、4つのLEDの点滅によって各T-FFの状態を表す出力A~Dが確認できる。回路を作製し、チャタリングシェーパーのボタンを押しながら、LEDの点滅を観察し図23に示

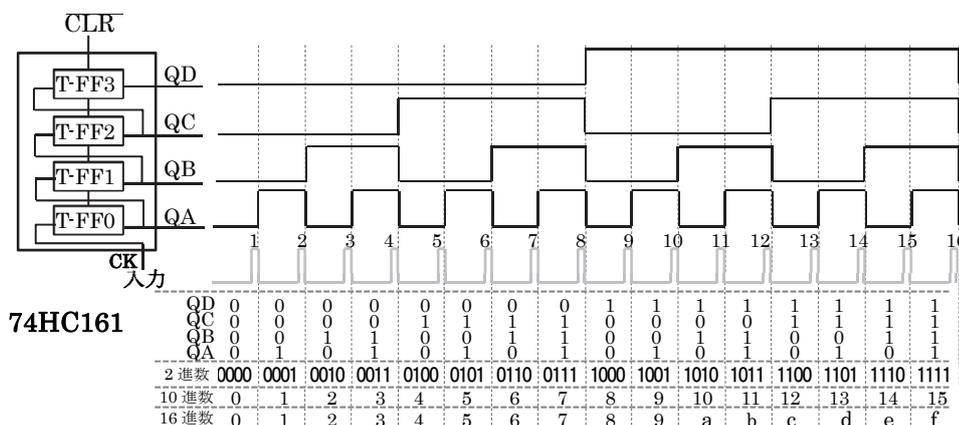


図23: 74HC161の構成

4個のTフリップフロップ(T-FF)を用いた16進カウンターになっている。それぞれのT-FFは、入力パルスの立下りで出力が反転し、入力パルスの数を半分にして出力する。T-FFは直列に繋がれ、各T-FFの出力(QA~QD)はカウントしたパルス数を2進数で表した時の各桁を表す。

したように QA~QD の出力が変化し、パルス数がカウントされていることを確認しなさい。

図中に描いてある  $\overline{\text{CLR}}$  (クリア) 端子は、通常は 1 にして使用するが、1 時的に 0 にすると全 T-FF が 0 にクリアされる。図 22 では Vcc につながれているが、追加課題で 10 進や 6 進のカウンターを作るときにはこの入力端子を用いる。又、図 22 にあるキャリー (CO) 端子は桁上げ出力で、2 つ以上の IC を直列に繋ぎ 2 桁以上のカウンターを作るのに用いられ、追加課題では 60 進のカウンターを作るのに用いる。

### 6.3 カウンター表示回路

前章のカウンター回路で、パルスを数えて 2 進数で表示することができた。しかし、普通の人間は 2 進数にはなじみがないので、できれば数字で表示してほしいと思うだろう。この章では、2 進数を数字として表示する回路を作り、カウンターに繋げる。

図 24 は数字の表示に用いる 7 セグメント LED 表示器である。7 つの細長い LED を 8 の時に並べて、LED の点滅で 0~9 までの数字と a~f までの文字を表示することができる。10 個のピンが出ており、LED の+極は共通に結ばれて 3 ピンと 8 ピンにつながれている。図の a~g の LED の一極が、外側に a~g と書かれたピンに接続されている。LED の並びが不規則なので対応するピン番号も不規則なので注意する必要がある。

(例えば、a は 7 ピン、g は 10 ピン等) 尚、5 ピン (P) は小数点である。3 か 8 ピンを Vcc につなぎ、a~g に対応するピンを接地すると対応する LED が点灯する。尚、LED の極性が反対の表示器もあり、この場合は 3、8 を接地し、a~g に対応するピンに+電圧を加えて使用する。

図 25 は SN9447N という IC を用いた表示回路の全体図である。LED との接続は基本的に a~g の対応する IC の出力と LED の入力を結ぶだけであるが、電流を制限するための抵抗をはさむ。抵抗値は 200Ω~1kΩ 程度なら何でも良いが、抵抗値によって明るさが変わる。図では 3 と 8 ピンを Vcc に繋いでいるが、どちらか一方でも良い。

入力、A~D をカウンターの対応する QA~QD に繋ぐだけでよい。

SN7447N は BCD デコーダと呼ばれる IC で 0~9 までの表示だけに対応している。IC によっては a~f も含め 16 進数すべてに対応する物もあるが、SN7447N では 10~15 に対応する 2 進数に対してはデータラメなパターンが出力される。

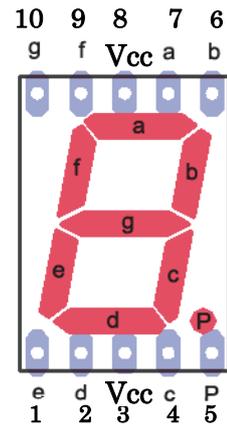
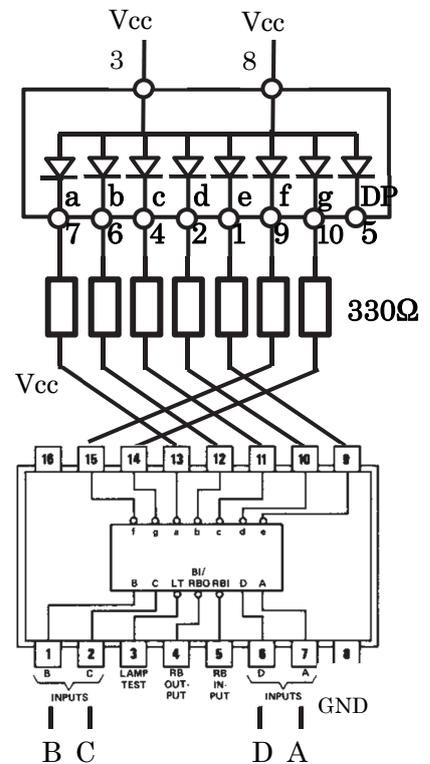


図 24 : 7セグメント LED 表示器



カウンタの出力(QA~QD)に繋ぐ

図 25 : SN7447N を用いた表示器

## 6.4 追加課題（タイマーの製作）

ここまでの課題が無事終了し、時間が余っている人は、右の図を参考にして以下の追加課題に挑戦しなさい。

### （1）10進・6進カウンターの作製

前章で数字表示のカウンターが完成したが、カウンターは16カウントで0に戻る16進カウンターのままである。人間にとっては10進カウンターの方が使いやすいのは言うまでもない。又、時計などでは6進（60進）カウンターも必要となる。任意の整数Nに対応するN進カウンターを作ることを考えよう。図22で、 $\overline{\text{CLR}}$ （クリア）端子を使えば、全T-FF出力を0に戻せることを説明した。これを利用し、カウンター回路に図26に示すように[?]で示した簡単な論理回路を付け足せばN進カウンターを構成できる。[?]回路は、QA~QDを入力として、出力を $\overline{\text{CLR}}$ に繋ぐ。通常は、出力が1であるが、入力がNに対応する2進数になった時だけ出力が一瞬0になりカウンターを0にリセットする。これによって、カウント数がNになると0に戻るN進カウンターができる。0~10に対する2進表現を図に表示したので、これを参考に6進・10進のための[?]回路を設計しなさい。どちらもNANDゲート一つで構成できるので、回路に組み込み動作を確認しなさい。

### （2）100進・60進カウンターの作製

カウンターICは、フルカウントで0に戻るが、この時にキャリア（CO）端子にパルスを出す。この出力を別のカウンターに入力すれば2桁のカウンターを作成することができる。この方法で、10進カウンターを2つ繋げて、100進（10進2桁）のカウンターを作り動作を確認しなさい。同様に、10進と6進のカウンターを組み合わせ60進のカウンターを作りなさい。

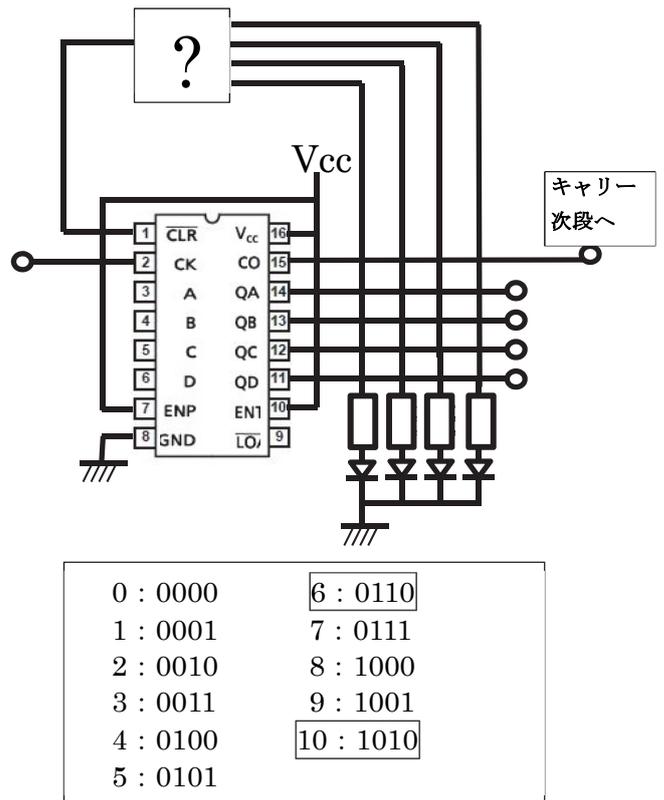


図26 : N進カウンターの回路図

### （3）タイマーの作製

60進カウンターに、図20中に示した発振回路を作製して組み込みなさい。この回路は約1秒間隔でパルスを発生させるので、これをカウンターの入力として60秒のタイマーを作製しなさい。余裕があれば、さらに60進カウンターを付け加えて1時間のタイマーを作製しなさい。