



熱線風速計の自作を目指した 電気・電子回路の優しい解説書

前 編

初めに：電気回路を解説するに当たって

「電気回路が苦手」あるいは「電気回路、大嫌い」、とご自身思い込みはありませんか。筆者自身も電気回路は大嫌いでした。ですから、手作りの電気回路を用いた実験が多い研究室を逃げ出し、別の研究室に移ったら、もっと電気回路を使う研究室でした。もう逃げ出せないのも、先輩の手ほどきを受けながら学び始めると思っているほど難しくなく、単に食わず嫌いであったことが分かりました。思い返せば、これまでの電気に関する先生の教え方にも問題があったのではないかと思います。この意味で、初心者に対しては自分自身の経験を活かしてこう説明したらいいのかなど、という反省を込めながら電気回路を解説しますので、是非肩の力を抜いて前向きに取り組んで下さい。

本解説書の最終目標は、定温度型の熱線風速計を读者ご自身の手で組立て、そしてその動作確認をするまでを解説することです。風速計が望み通りに動いた瞬間、「やったー、何だ！簡単じゃないですか」、という印象を受けるに違いありません。

この感動を味わってもらいたい思いで、電気や電子回路に疎い方々でも目標が容易に達成できるよう、本書は電気回路の基本からおさらいしながら、1段1段知識を積み重ねる構成にしています。というのは、電気回路は数学と同じように極めて論理的だからです。ただこの一段毎の説明はくどくどと記述せず、重要なポイントに絞って説明することとし、さらに知識を深めたい読者のために、Option になります。Option なる補足説明を多く取り入れることにしました。ここまでは、前編としてまとめました。

後編には、学んだ回路を実際に組み立て動作確認するまでを解説します。電気回路を実際に結線するには、一昔前にはハンダごては必須の道具でしたが、今回は Bread Board といわれた穴あきの万能基板を使って、両端にピンのついたコードやジャンパ線で結線するので、ハンダの不良など気にせずにと簡単に回路の結線・組立や、結線の変更・修正が可能です。カラーコードを使うので結線確認が目視出来るので始点と終点を容易に確認できることも大きな利点の1つです。

Practice leads you to fruitful success, if you do not have a prejudice against electrics/electronics.

解説書の前編目次

1. 電気回路で使う記号の定義
2. オームの法則のおさらい
3. 細い金属線の加熱特性
4. オペアンプの基本動作
5. Wheatstoneブリッジの差動増幅器の結合
6. 熱線の流速にする冷却効果と動作点
7. 実用的な定温度ブリッジ回路
8. 大切な熱線センサの保護

前編は座学です。以下のように電気回路の基本である電気回路の記号やオームの法則から説明を進め、前編では上記の目次に従いながら、少しずつ知識を積み上げ最後には実用的な定温度型熱線風速計まで学びます。

1. 電気回路で使う記号の定義

本書で使う主要な電気・電子部品は、最も基本の3種類です。つまり、抵抗、コンデンサ及び演算増幅器 (Op Amp: Operational Amplifier) です。この他、電気部品としてコイル、すなわちインダクタンス(Inductance)があり多くが高周波回路には多用されますが、この部品が有効になる周波数帯域は対象としないので、本書では説明を割愛します。

演算増幅器、という言葉は、聞きなれないかも知れませんが、詳細は後述するとして、ここでは英語表記を縮めて**オペアンプ**と呼ぶことにします。3種類の記号を、図1にまとめました。

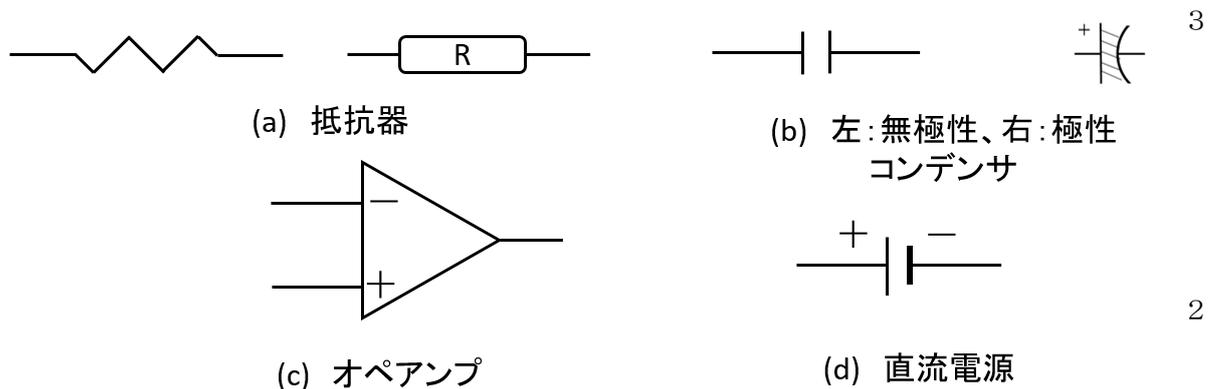


図1. 電気記号

本書では抵抗器の記号として、抵抗体を表すギザギザ記号と形状を表す箱型記号を、またコンデンサは無極性のものと極性を持つものがあり、後者には正極には+記号を付します。極性を持つコンデンサは電源回路に使われることが多いので容量も外形も無極性に比べ大きい。斜線は容器内の電解液にオイルを用いている名残でしょう。

もう1つ、電気回路を作動させるには、外部直流電源が必要です。その記号は長い棒が+極、太く短い棒は負極です。コンデンサの記号と似ているのは、機能が同じだからで、容量の大き

なコンデンサは電池とみなすことができる訳ですから。

上記 3 部品の他にも、半導体であるダイオード(Diode)とトランジスタ(Transistor)も用いるので、記号を記しておきます。記号には→あるいは▽記号が使われていますが、これらは電気の流れる方向を示しており、その逆には電流は流れない半導体を象徴しています。

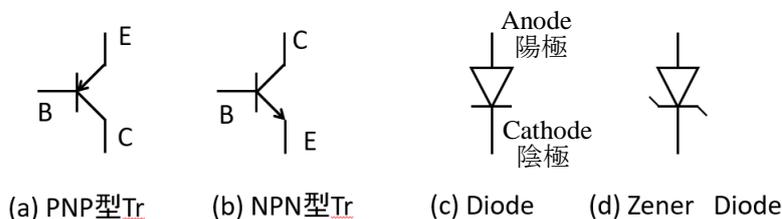


図 2. Diode と Transistor の電気記号

単にダイオードと呼ぶときは、通常シリコン系的高速スイッチングダイオードを指しますが、Zener (ゼナー) 効果を使った定電圧ダイオード、光を発する LED さらには印加電圧に無関係に定電流を流すダイオードがあります。本稿では高速スイッチングダイオードに限定します。トランジスタは多種多様で、回路で必要となった際に解説します。トランジスタとダイオードについてさらに詳しく解説した補足資料 C も用意されています。

2. オームの法則のおさらい

2.1 抵抗器 1 本の回路

オームの法則は電気回路では最も基本ですから再度おさらいしてみます。図 2 は直流電源の出力電圧を V とし、1 個の抵抗器の抵抗値を R とすると、回路に流れる電流 I の間には

$$V = RI \tag{1}$$

の関係が知られています。この関係式はオーム(Ohm)の法則と呼ばれ、周知の通りです。また、抵抗器に電流が流れると必ずジュール熱 (Joule heating) が発生するので、回路を設計する上で重要なので取り上げます。

その発熱量の単位としてワット(Watt)が使われ、その定義は抵抗器両端間の降下電圧と電流の積で

$$W = VI = RI^2 \tag{2}$$

で表されます。こちらの式も周知の通りです。安心して回路を使うためには、常に抵抗器の許容 Watt 数内で使う必要があるのは言うまでもありません。

なお、電圧を無条件で使う際の定義は、電池あるいは直流電源の負極に対する正極間の電位差を表します。従って、電位差は、任意の 2 点間の相対的な電圧の差を表わすことになります。

抵抗器の種類や電気規格の Watt 数分類など詳細は補足 D を参照して下さい。

・
・

3. 細い金属線の加熱特性

・

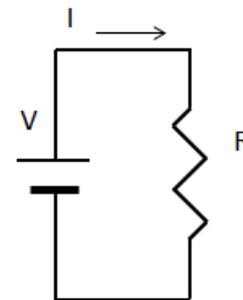


図 2. 最も基本的な電気回路

4. オペアンプの基本動作

ここまでで学んだ回路を組み合わせて、実用的な定温度型熱線風速計回路を組立てます。

5. Wheatstone ブリッジと差動増幅器の結合

熱線の抵抗を自動的に一定に保つ方法として、Wheatstone ブリッジとオペアンプを組合すことで実現できる可能性が出てきましたので、さらに議論を進めましょう。

図 9 は Wheatstone ブリッジの非平衡電圧 $V_A - V_B$ を利得 $G = R_2/R_1$ をもつ差動増幅器で増幅し、その出力をブリッジ頭部に帰還させて常時 $V_A = V_B$ の実現を意図した回路図です。つまり、何らかの理由で熱線の冷却が増加しその抵抗が小さくなると端子電圧 V_A が減少す

るので、この減少分を増幅しブリッジ電圧を増加して加熱電流を増すことで $V_A = V_B$ の平衡が達せられることが期待されます。この逆に冷却が緩和された際には、加熱電流を減少させます。本当にこのような制御が実現できるかどうか、回路解析を進めてみましょう。

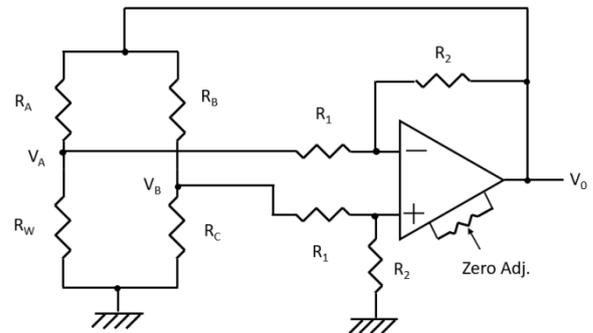


図 9. Wheatstone ブリッジと差動増幅器の結合

7. 実用的な定温度ブリッジ回路

図 9 の定温度ブリッジ回路だけでは定温度モードは実現できません。その 1 つの理由は、 g 動増幅器 (オペアンプ) の出力電流は通常高々 10-20mA 程度で、直径 $5\mu\text{m}$ 前後の金属線を十分加熱することができないためです。そこで、電流増幅する必要があります。電流増幅と言っても大袈裟ではなく、パワートラジスタを 1 個追加するだけです。トラジスタは今回の説明から除きましたので、補足 C で簡単に触れることとし、ここでは図面に従って理屈より先に組立を優先しましょう。

ただもう 1 つ念頭に置かなければならないことは、差動増幅器は正負の直流電源を必要とします。それ故、定温度ブリッジ出力は正負いずれも設定可能です。例えば、負の出力が希望の場合にはトラジスタを PNP タイプに、逆に正の出力では NPN タイプを選ぶだけのことです。以上を踏まえて、PNP タイプの実用的な回路を図 13a に示します。

実用的回路を目指した図 13 は図 9 に比べて何点か部品が追加されているので、その追加理由を説明する必要があります。オペアンプには正負の直流電源を供給しますが、その中間電位を Common (正負電源に共通する線であることから) と呼び、しばしば **COM (コム)** と略記し、**GND** とは明確に区別しています。後者はあくまで地球と同電位にすることを意味していますが、CTA 回路の COM は地球と同電位にする必然性はありません。ただ、低雑音化などの対策では

しばしば COM は GND に落とす（接続する）ことがあります。

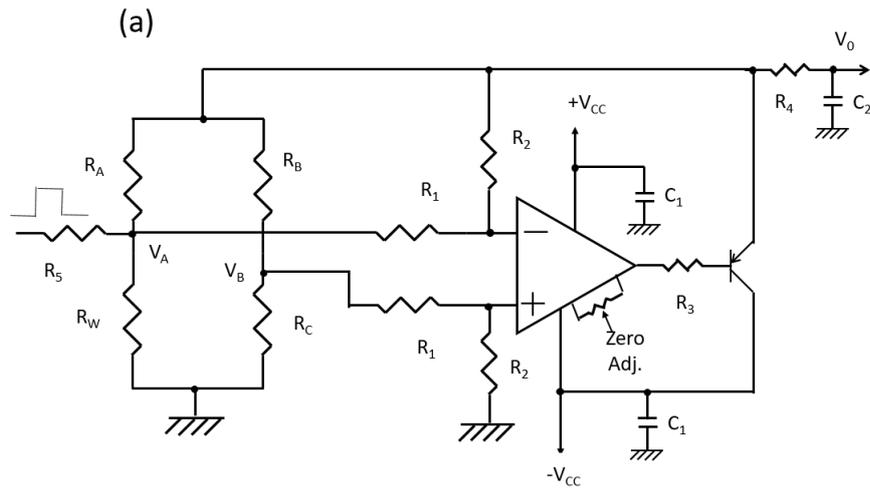


図 13. 実用的な定温度型 CTA 回路

さて、オペアンプの正負電源供給点に使われているコンデサ C_1 は、バイパスコンデンサ、あるいは decoupling コンデンサと呼ばれ、電源に重畳する高周波成分を、オペアンプに流入しないよう COM にバイパス(bypass)させる役割を担っています。つまり低雑音化対策として用い、 $0.1 \mu\text{F}$ 程度の小型で高周波特性の良いセラミックコンデンサが多く使われています。decouple は結合を切る、という意味ですから、この結合は直流成分と交流成分を指すのは明かです。

また、出力段には抵抗 R_4 とコンデンサ C_2 が繋がっています。この 2 つの部品には 2 つの理由が込められています。1 つは、誤って出力 V_0 を COM 線にショートした場合、例えば出力電圧が 1V であるなら、ショートによる出力電流は、 $1\text{V}/R_4$ に抑えられます。例えば $R_4=100\Omega$ ならショートによる過電流は 10mA で、オペアンプにとっては許容範囲におさまるので、回路に大きな損傷を与えることは回避できます。もう一つの理由は、定温度型ブリッジに使われるオペアンプは高利得でしかも帯域が広い高速型のものが使われるので、 R_4 と C_2 で一次の低域通過フィルタ(Low Pass Filter)を構成して、高周波雑音を低減します。詳細は、補足 A に追記しますが、遮断周波数は $f_{\text{LPF}}=1/2\pi R_4 C_2$ ですから、計測したい周波数の 5~10 倍程度に設定することで、低雑音効果は期待されます。

8. 大切な熱線センサの保護

実用的な定温度型熱線風速計の基本回路を学びました。何事も予定通りに行けば問題は生じませんが、現実には、機械的な断線ではなくちょっとしたはずみで熱線に過電流が瞬時に流れて熔断することがしばしばあります。どんな場合に過電流が起こる一例を示しましょう。

- ・
- ・
- ・