

発光ダイオードを温度センサとして用いた簡易なパソコン制御温度計測システム A Simple Computer-controlled Temperature-measurement System Using an LED as a Temperature Sensor

小山 英樹* 西村 尚大**
KOYAMA Hideki NISHIMURA Naohiro

小電流駆動が可能で生徒の関心も高い発光ダイオード (LED) を温度センサとして用いた、パソコン制御による低コストで簡易な温度計測システムの開発を目指し、その回路構成と制御プログラムについて検討を行った。A/D コンバータは、安価な制御基板 (USB-IO 2.0) に抵抗ラダー回路と汎用オペアンプを接続して、パソコンのプログラムで逐次比較処理を行うものを自作して使用した。これに約4.5 μ A の微小電流を LED に流す定電流回路、およびアノード・カソード間の微弱な電圧変化を増幅する電圧増幅回路を設計し、接続した。試作したシステムは10~39 $^{\circ}$ Cの範囲で温度に対し直線的に変化する電圧を出力し、その電圧値を A/D コンバータを通してパソコンに取り込むことができる。外部電源は用いておらず、制御基板の他は4回路入り汎用オペアンプ1個と抵抗のみであるため、低コストで製作も比較的容易である。制御プログラムは広く普及している Microsoft 社の Excel VBA または Visual Basic で作成することができる。

キーワード：LED, 教材, 電子回路, D/A 変換器, A/D 変換器

Key words : LED, teaching tool, electronic circuit, D/A converter, A/D converter

1. はじめに

発光ダイオード (LED) は長寿命・高効率の光源として家庭電化製品の表示ランプ、屋内外の照明、信号機、自動車用ランプなど、身近なところで多く使われている。ホームセンターや通信販売などではさまざまな発光色のものが販売されており、安価で容易に入手が可能である。学校における実験用の教材としても多く用いられており、特に 1 mA 未満の小電流でも発光が確認できることを利用した発電装置¹⁻³⁾ や、高速で点滅可能であることを利用した光通信実験装置^{4, 5)} などが開発され、従来の豆電球ではできなかった実験が可能になっている。2014年に青色高輝度 LED の開発で日本人がノーベル物理学賞を受賞したこともあり、LED に対する生徒の関心は高い。

LED をはじめ一般にダイオードは、電流一定の条件で、アノード・カソード間の電圧が温度に対し直線的に変化することが知られている^{6, 7)}。したがってあらかじめ温度に対する電圧の変化を測定しておけば、ダイオードの電圧により温度を測定することが可能になる。市販の IC 温度センサを使用する場合に比べれば校正が必要であるなど多少手間がかかる部分もあるが、原理が分かりやすいため半導体部品や計測・制御技術の理解に役立つ、教材として有効であると考えられる。実際、理科の実験などでこのようなダイオードをセンサとした温度測定装置の自作が試みられており、比較的簡単な回路構成

で十分な測定精度が得られている⁸⁾。

温度センサとして使用する場合、センサ自体の発熱はできる限り抑えなくてはならない。したがって、ダイオードに流す電流は小さい方が、発熱が抑えられ正確な温度測定が可能になる。また、電流が小さい方が温度に対する電圧変化の傾きも大きくなり、感度の高い測定が可能になる^{6, 7)}。しかし、電流が小さすぎて逆方向飽和電流と同じレベルになると、温度に対する電圧の変化の関係が直線近似できなくなるため、センサとしては使用しにくくなる⁷⁾。LED は一般のシリコン整流用ダイオードに比べ、材料である半導体のバンドギャップエネルギーが大きいため、逆方向飽和電流は小さく、小電流でも電圧の温度変化が良好な直線性を保っている。つまり、自己発熱が少なく、感度の高いセンサとして利用することができる。

本研究は LED のこのような特長を生かした、教材として利用可能な簡易な温度計測システムを開発することを目的としている。

2. デジタル入出力基板と抵抗ラダー回路を使用した A/D コンバータ

できる限り低コストで製作可能なものとするため、本研究では制御基板として USB-IO 2.0⁹⁾ を使用した。USB-IO 2.0はポート1 (8ビット) とポート2 (4ビット) の合計12ビットのデジタル入出力ポートを有し、

*兵庫教育大学大学院教科教育実践開発専攻生活・健康・情報系教育コース 教授

平成29年4月25日受理

**神奈川県立磯子工業高等学校

Microsoft Visual Basic や Excel VBA を使用して容易に制御プログラムを作成することができる。デジタルデータの入出力しかできないため、アナログ電圧を測定するためには A/D コンバータが必要になる。そこで、抵抗ラダー回路とコンパレータを使用し、プログラムで制御する逐次比較型 A/D コンバータ^{10, 11)} について検討した。

逐次比較型 A/D コンバータは、設定したデジタル値を D/A 変換したアナログ電圧と測定対象のアナログ電圧を順次比較しながら、最終的に測定対象のアナログ電圧に最も近いアナログ電圧を与えるデジタル値を決定するもので、構成要素として D/A コンバータが必要になる。そこでまず D/A コンバータの特性を評価した。図 1 に実験に使用した D/A コンバータの回路図を示す。USB-IO 2.0 のポート 1 (8 ビット) に 10kΩ と 20kΩ の抵抗からなる R-2R ラダー回路を接続している。このように回路を接続すると、ポート 1 の 8 ビットデジタル値 $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1a_0$ (各値は「0」または「1」) の D/A 変換を行う電圧加算型 D/A コンバータとして動作し、

$$V_{DA} = \frac{2}{3} \left(\frac{a_7}{2} + \frac{a_6}{4} + \frac{a_5}{8} + \frac{a_4}{16} + \frac{a_3}{32} + \frac{a_2}{64} + \frac{a_1}{128} + \frac{a_0}{256} \right) V_{CC} \quad (1)$$

で与えられるアナログ電圧 V_{DA} を出力する。デジタル値を 10 進数 N

$$N = 128a_7 + 64a_6 + 32a_5 + 16a_4 + 8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + a_0 \quad (2)$$

を使って表すと、 V_{DA} は

$$V_{DA} = \frac{2}{3} \frac{N}{256} V_{CC} \quad (3)$$

となる。

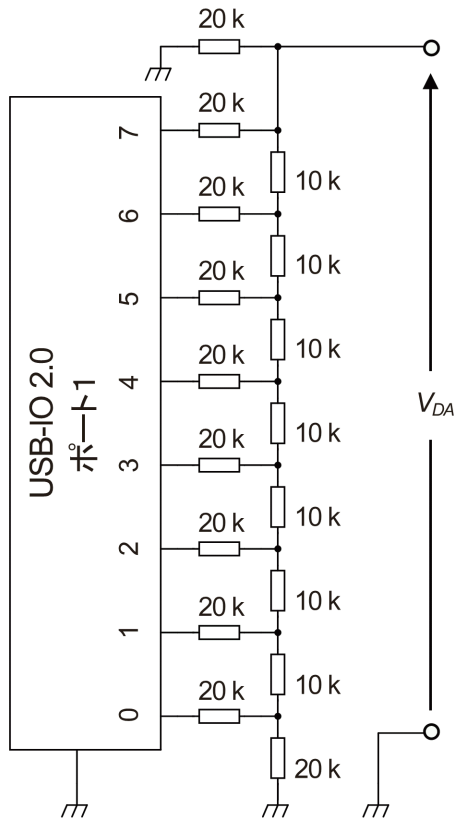


図 1. D/A コンバータの回路図

ポート 1 に 0 ~ 255 のデジタル値を出力したときの V_{DA} の値をデジタルマルチメータ (ADCMT 7351E) を用いて測定した結果を図 2 に示す。なお、このときの V_{CC} の測定値は 5.0958 [V] であった。図から明らかなように V_{DA} の測定値は (3) 式から計算される値 (理論値) とほぼ一致し、誤差は最大 0.6% であった。

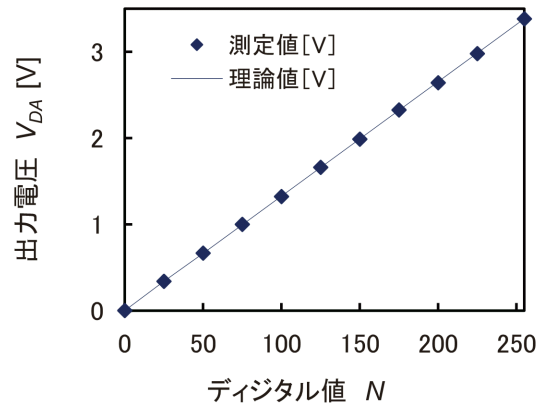


図 2. D/A コンバータの出力特性

図 3 は A/D コンバータの回路図である。汎用オペアンプ LM324 をコンパレータとして使用し、測定対象のアナログ電圧 V_{IN} と D/A 変換出力電圧 V_{DA} とを比較してその結果を USB-IO 2.0 のポート 2 (ピン 0) に出力している。 $V_{DA} < V_{IN}$ のとき「1」、 $V_{DA} > V_{IN}$ のとき「0」が出力されるので、ポート 2 の最下位ビットが「1」であるか「0」であるかを調べれば、 V_{DA} と V_{IN} の大小関係を判別できる。

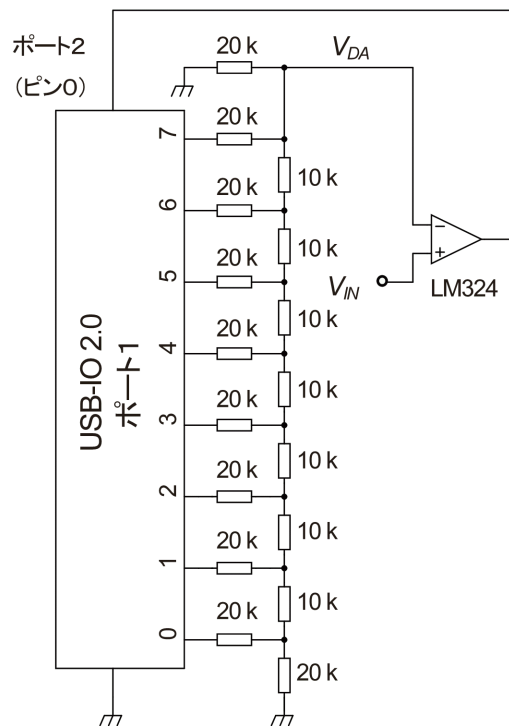


図 3. A/D コンバータの回路図

プログラムによる A/D 変換処理の流れを図 4 に示す。初めに 8 ビットのデジタル値を 00000000 に初期設定した後、最上位ビット (a_7) から順に「1」に設定し、D/A 変換出力 V_{DA} と測定対象のアナログ電圧 V_{IN} とを比較する。比較の結果はコンパレータの出力 (ポート 2 の最下位ビット) に現れ、コンパレータの出力が「1」の場合には $V_{DA} < V_{IN}$ であり、デジタル値の当該ビットが「1」と確定する。コンパレータの出力が「0」の場合には $V_{DA} > V_{IN}$ であり、当該ビットは「0」になる。この処理を最下位ビット (a_0) まで行って 8 ビットのデ

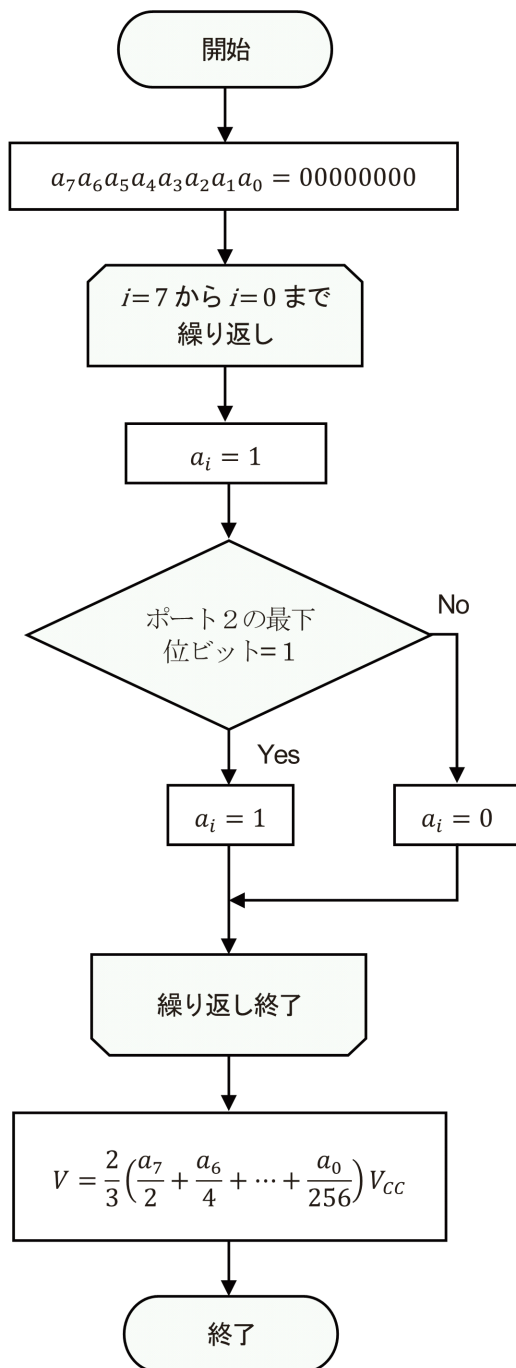


図 4. A/D 変換処理の流れ

ジタル値を決定し、(1) 式によりアナログ電圧の測定値を計算する。

以上の方法により A/D コンバータを作製し、直流安定化電源 (GW Instek GPD-33035) の電圧を測定してその評価を行った。結果を図 5 に示す。図から明らかなように、測定結果は直流安定化電源の電圧 (点線) とほぼ完全に一致している。誤差は最大で 2.24% であった。

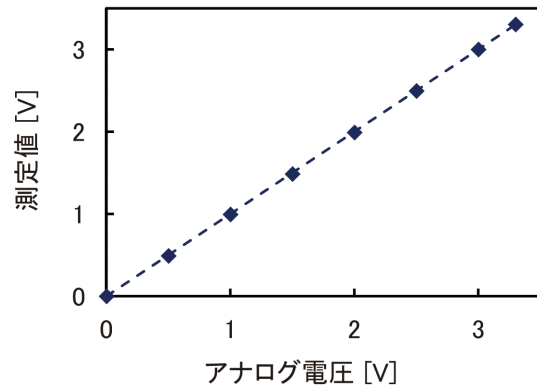


図 5. A/D コンバータの評価結果

3. LED を温度センサとして用いた温度計測装置

LED を温度センサとして用いる場合、前述したように一定電流を流した状態でアノード・カソード間の電圧を測定することになる。したがって定電流回路と A/D コンバータが必要になる。また、測定する温度範囲を年間の室温の変化の程度 (10~35℃ 程度の範囲) と想定すると、その電圧変化は数十 mV であり、微小であるため電圧増幅回路も必要である。定電流回路、電圧増幅回路はオペアンプを使って構成することができるので、4 回路入りのオペアンプ (LM324) を使用すれば、コンパレータも含めて 1 個の IC で実現できる。そのようにして構成した装置の回路図を図 6 に示す。なお、オペアンプ IC の電源は USB-IO 2.0 の V_{CC} 端子から供給しており、外部電源は使用していない。

センサ部では、オペアンプを用いた定電流回路により赤色高輝度 LED (HLMP-C115) に一定電流を流すようにしている。ただし、回路を単電源で構成しなければならないため、出力電圧が負になるような構成はできない。また、後段の電圧増幅を部品数の多い差動増幅回路 (オペアンプ 3 回路必要) ではなく、オペアンプ 1 回路で構成可能な非反転増幅回路にするためには、最も低いときの出力電圧が GND レベル (0 V) にできるだけ近くなるようにする必要がある。そのため、LED のアノード電位を 56k Ω と 22k Ω の 2 個の抵抗で分圧した電位 (約 1.4 V) になるようにした。

LED に流す電流は、小さいほど温度に対する電圧の変化が大きくなり、温度測定の感度が高くなる^{6,7)}。また、電流を小さくすれば、自己発熱の影響も抑えること

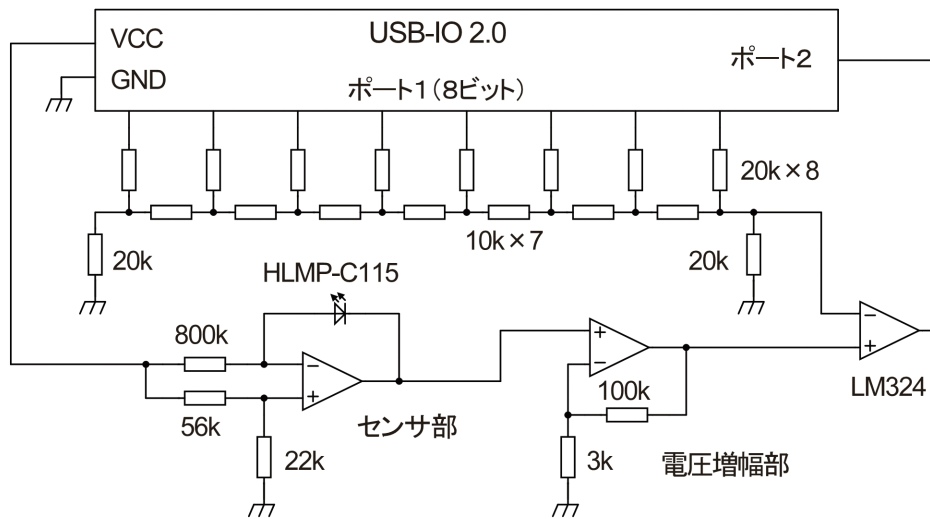


図 6. 温度計測装置の回路図

ができる。そこで、電流を制限する抵抗を高めの800kΩとした。LEDに流れる電流は約4.5μAであり、この場合、発光は肉眼では確認できない。

このセンサ部回路の出力電圧は、測定の結果、10℃から35℃の温度範囲で66mV変化することがわかった。オペアンプLM324の最大出力電圧が $V_{cc} - 1.5$ [V]、すなわち約3.5Vである¹²⁾ことを考慮すると最大で50倍程度の増幅が可能であるが、A/D変換可能な最大電圧がそれより低い約3.3Vであること、LEDの電圧の個体差を考慮して動作可能な電圧範囲に余裕を持たせる必要があること、また入手しやすい値の抵抗を使用すべきであること、などの点から、電圧増幅部には3kΩと100kΩの抵抗を用いた約34倍の非反転増幅回路を使用することにした。

ユニバーサル基板上に試作した装置の外観を図7に示す。外部電源を使用していないこと、A/Dコンバータに抵抗のラダー回路を使用し、USB-IO 2.0以外のICは4回路入りのオペアンプ1個のみであることなどから、非常に簡素で製作しやすく、また小型で持ち運びしやすいものとなっている。

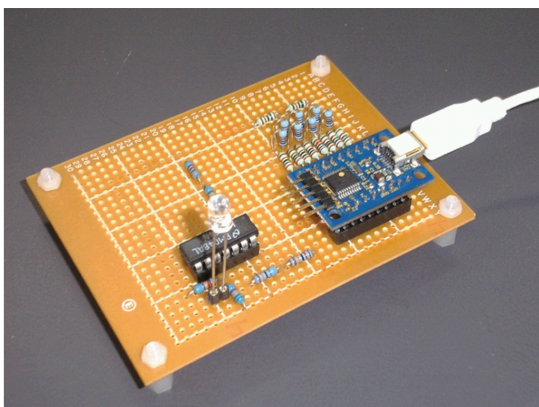


図 7. 温度測定装置の外観

センサとして使用したLED (HLMP-C115) のみを恒温槽 (日本プロアー製バイオチャンバー LS-5N) に入れて温度を10℃から40℃の範囲で変え、Excel VBAで作成したプログラムにより試作した温度測定装置を動作させ、A/Dコンバータを通して得られる電圧 (電圧増幅部の出力電圧) を測定した。その結果、10~39℃の範囲で図8に示すように直線的な関係を得ることができた。直線の傾きは95.3mV/℃であり、この値を用いれば、測定結果を温度で表示するプログラムを作ることができる。

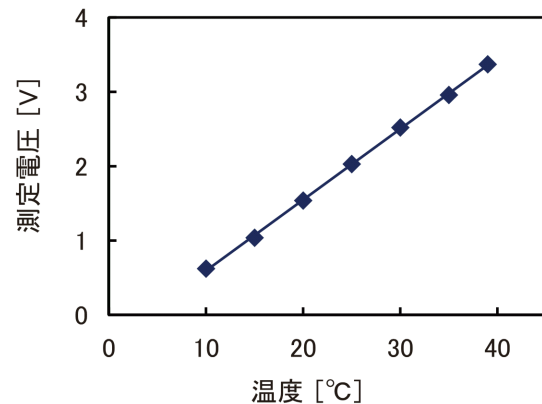


図 8. 温度に対する電圧の変化

4. まとめ

自己発熱が少なく、高感度で生徒の関心も高いLEDを温度センサとして用いた簡易な温度計測システムを開発するため、その構成を検討し、回路と制御プログラムの試作を行った。教育現場での利用がしやすくなるよう、低コストでできるだけ簡素なシステムにするため、安価な制御基板であるUSB-IO 2.0を用い、測定データをパソコンに取り込むA/Dコンバータも専用のICを使わずに自作した。作製したA/Dコンバータは制御基板と抵抗ラダー回路、および汎用オペアンプのみにより構成さ

れ、プログラムで逐次比較処理を行うものである。センサとして用いた LED には約 $4.5\mu\text{A}$ という非常に小さい電流しか流さないため発熱は少なく、また温度に対する電圧の変化も比較的大きい。A/D コンバータ、LED の定電流回路、電圧増幅回路に同じ汎用オペアンプを使用したため、オペアンプ IC は 4 回路入りのものを 1 個しか使用していない。電源も外部電源を使用せず、USB から供給される電力のみで動作するようになっており、システム全体として非常にコンパクトで扱いやすいものとなっている。制御プログラムも広く普及している Microsoft 社の Excel VBA や Visual Basic を使用して作成することができるため、多くのパソコンですぐに利用でき、また使用方法に合わせて改良することも容易である。試作したシステムの評価を行った結果、温度 $10\sim 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で、温度に対し傾きが $95.3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ の直線的な出力電圧の変化を確認することができた。

参考文献

- 1) 渡辺理文, 鎌田正裕: 光と電気の間でのエネルギー変換を実感させるための教材, 物理教育, 第59巻, 第1号, pp. 9-13 (2011).
- 2) 鶴田孝一, 小池守, 高津戸秀: 音エネルギーに対する生徒の理解を深める中学校理科学習における授業実践研究, 理科教育学研究, 第50巻, 第3号, pp. 135-143 (2010).
- 3) 若山裕章, 小山英樹: 振動発電教材の高効率化のための回路の検討と授業実践, 兵庫教育大学学校教育学研究, 第28巻, pp. 39-43 (2015).
- 4) 長谷川誠: 発光ダイオードを用いた光通信実験セットとそれを利用した演示実験の実践, 応用物理教育, 第32巻, 第2号, pp. 27-32 (2008).
- 5) 小山英樹, 高田裕治: 簡易な双方向光通信実験装置, 第72回応用物理学会学術講演会講演予稿集 p. 18-047 (2011).
- 6) Y. B. Acharya and P. D. Vyavahare: Study on the temperature sensing capability of a light-emitting diode, Rev. Sci. Instrum. vol. 68, no. 12, pp. 4465-4467 (1997).
- 7) 小山英樹, 西村尚大: 高輝度発光ダイオードの温度センシング特性, 兵庫教育大学研究紀要, 第48巻, pp. 63-67 (2016).
- 8) 西岡正泰, 伊藤康明: ダイオード温度計を用いた液体の比熱の測定, 物理教育, 第26巻, 第2号, pp. 133-136 (1978).
- 9) 小松博史: かんたん! USB で動かす電子工作, オーム社 (2011).
- 10) 渡辺明禎: VB と製作で学ぶ初めてのパソコン応用工作, CQ 出版社 (2002).
- 11) 池田政也: コンピュータを用いた簡易な電流-電圧特性測定装置の開発, 兵庫教育大学大学院学校教育研究科修士論文 (2010).
- 12) LM324/LM2902データシート, ナショナルセミコンダクタージャパン (2000).