

2色LEDの光センシング特性と障害物検知への応用

Light-sensing Capability of Dual-color LEDs and Its Application to Obstacle Detection

小山英樹* 殷夢澤**
KOYAMA Hideki YIN Mengze

1つのパッケージに発光色の異なる2個の発光ダイオード(LED)が実装された2色LEDの新たな応用として、その短波長側(青または黄緑色)LEDを発光素子、長波長側(赤色)LEDを受光素子とした、小型で一体化された光センサモジュールとしての利用の可能性を検討した。鏡、白色紙、段ボール、黒色紙を対象物とした反射光検知特性の測定では、使用した4種類の2色LEDのすべてにおいて短絡電流の変化は数 μA と小さかったものの、開放電圧の変化は比較的大きいものもあり、鏡および白色紙に対して最大数百mVの値が得られた。最も高い開放電圧の変化を示した2色LEDを用いて、パソコン制御による簡易で低コストの障害物検知システムを試作して動作確認を行ったところ、距離1cm程度で白色紙を検知しその情報をパソコンに取り込むことができた。

キーワード：発光ダイオード、光センサ、受光素子、計測・制御、教材

Key words : light emitting diode, optical sensor, optical receiver, measurement and control, teaching tool

1. はじめに

長寿命・高輝度・低消費電力の光源である発光ダイオード(LED)は、照明やディスプレイ、信号機などの製品ですでに多く使用され、われわれの身の回りに急速に普及しつつある。様々な発光色のものがあり、小型で安価、また低電圧・小電流で駆動が可能であることから学校教育の現場でも教材として広く用いられている¹⁻⁸⁾。

LEDは太陽電池やフォトダイオードと同じく半導体材料のpn接合を基本構造としているため、光を照射すると内部光電効果により起電力を生じるという特徴をもっている⁹⁻¹²⁾。逆方向電圧を加えている場合には光電流が流れるため、フォトダイオードとしての利用が可能である。この発光と受光の両方の機能を有するという特徴は、特に双方向光通信への応用に向けて注目を集め、多くの研究成果が報告されている^{9, 13-16)}。学校教育に関わるものとしては、光通信実験の受光素子としての利用^{2, 3)}のほか、エネルギー変換学習のための光電池⁵⁾として、また光電効果そのものの学習を目的とした実験¹¹⁾にも利用されている。教材・教具としての利用を目的とした簡易な双方向光通信実験装置の開発も試みられ、実際に生徒が光通信で会話を体験する授業実践も行われた¹⁷⁻²⁰⁾。1つのLEDを送受信兼用としているため部品数が少なく簡易な回路構成となり、また伝送路が1本となるため光ファイバや鏡を利用した実験がしやすいという利点もある。

半導体の内部光電効果は、バンドギャップエネルギーと同じ、もしくはそれよりも大きい光子エネルギーを有する光に対してのみ発生する。LEDの場合、発光により放射される光と同じか、それよりも波長の短い光が照射されたときに光起電力や光電流が観測される。したがって波長の短い(470nm前後)青色LEDの場合は可視光では青色～紫色の光に対してのみ反応するが、波長の長い(630nm前後)赤色LEDの場合はほとんどすべての可視光に対して光電効果を観測することが可能である。

現在、発光色の異なる2つ(緑/赤など)または3つ(青/緑/赤)のLED素子が1つのパッケージに実装された2色または3色LEDが屋外ディスプレイなどに多く用いられており、電子部品販売店で容易に入手することができる。このようなLEDの青または緑色LED素子が発光素子、赤色LED素子を受光素子として用いることができれば、光源と光センサが一体化された小型で安価のセンサモジュールとしての応用が可能となる。特に、発光素子と受光素子の相対的な位置や角度の調整が不要になるため、自律ロボット教材の障害物検知やラインレースにおいて、精度の高い制御を容易に行うことができるようになる。

そこで本研究では、このような2色/3色LEDの新たな応用として光センサモジュールとしての利用の可能性を検討するため、基礎特性の評価とシステムの試作を行った。ここでは、市販の4種類の2色LEDについて、

*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30年4月2日受理

**兵庫教育大学大学院学校教育研究科(修士課程)教育内容・方法開発専攻行動開発系教育コース 修了生

光センサモジュールとして使用した場合の反射光検知特性を測定した結果について報告する。また、最も高い反射光検知特性を示したLEDを用いて簡易なパソコン制御障害物検知システムを構成し、その動作を確認したのでその結果についても報告する。

2. 2色LEDの反射光検知特性

表1に示す4種類の2色LEDを使用して実験を行った。表中の発光波長、光度、半値角の数値は、それぞれのデータシートに記載されているものである（順方向電流 $I_F = 20\text{mA}$ での値）。

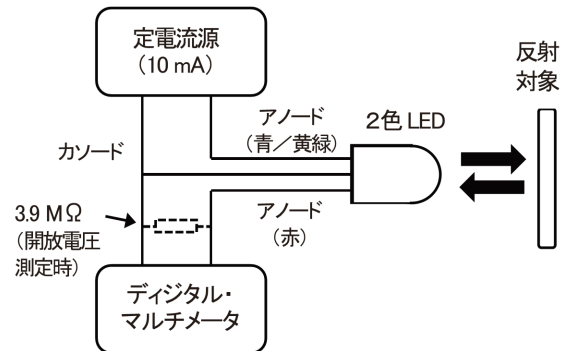
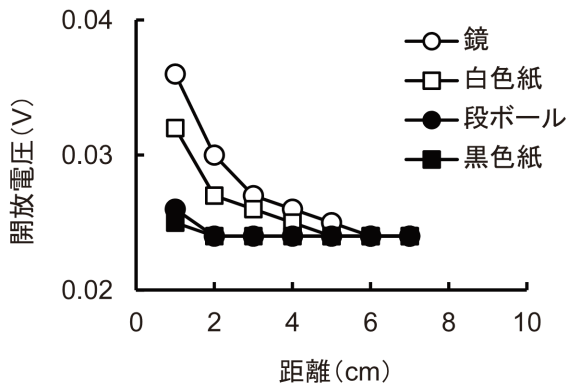


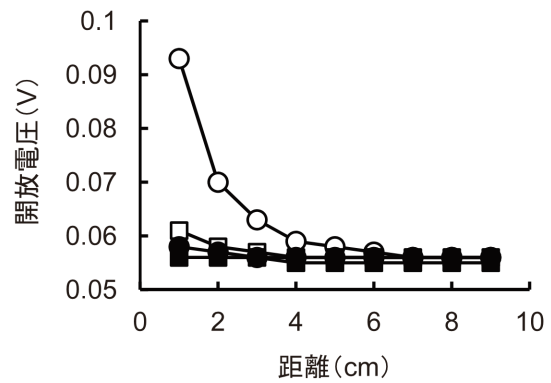
図1. 反射光検知特性の測定方法

表1. 使用した2色LED

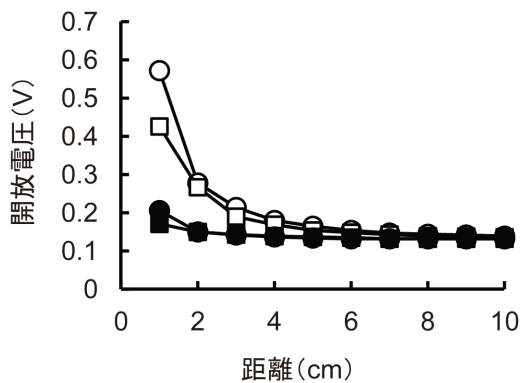
型番	発光色	発光波長 (nm)	光度 (cd)	半値角 $2\theta_{1/2}$ (°)
OSRGHC5B31A	黄緑	570	1.1	30
	赤	625	1.56	
L59SURKSGC	黄緑	568	0.2	24
	赤	630	1.6	
OSRB5131A-C	青	470	5.8	30
	赤	625	7	
L-519LBHURC	青	470	1.2	20
	赤	633	0.75	



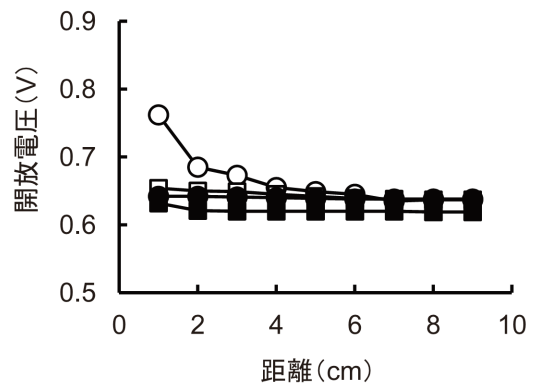
(a) OSRGHC5B31A (黄緑/赤)



(b) L59SURKSGC (黄緑/赤)



(c) OSRB5131A-C (青/赤)

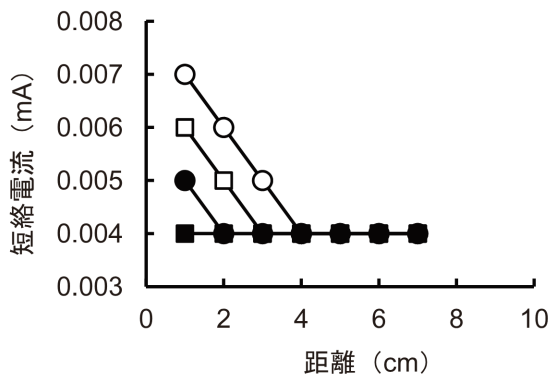


(d) L-519LBHURC (青/赤)

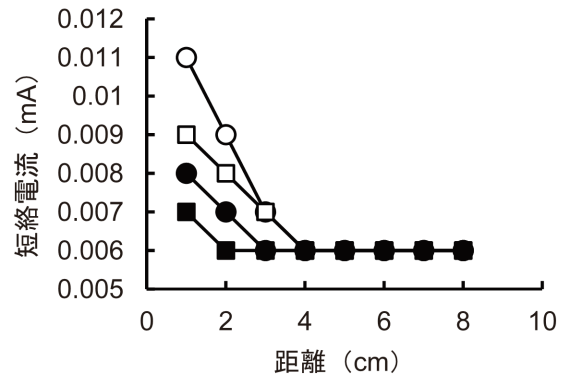
図2. 開放電圧の測定結果

反射光検知特性の測定方法を図1に示す。2色LEDの短波長側（青または黄緑色）LED素子に一定電流（10 mA）を流して発光させ、その光を反射対象（鏡、白色紙、黒色紙、段ボールの4種類）に垂直に照射し、反射対象からの反射光により長波長側（赤色）LED素子に生じた開放電圧および短絡電流をLEDと反射対象との距離を変えて測定した。ただし開放電圧測定時には測定の安定化のため、素子に並列に3.9MΩの抵抗を接続している。定電流源には直流安定化電源（GW Instek GPD-3303S）、開放電圧ならびに短絡電流の測定にはデジタル・マルチメータ（ADCMT 7351E）を用い、暗所にて測定を行った。

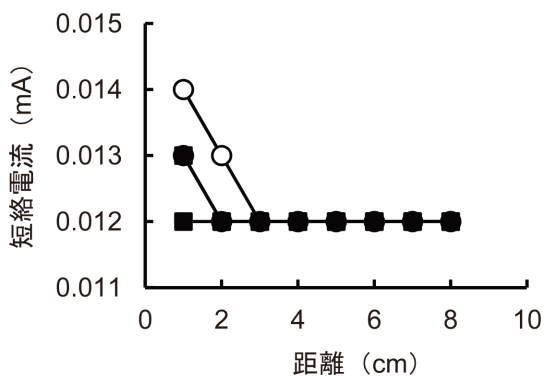
開放電圧の測定結果を図2に示す。いずれのLEDにおいても反射対象が鏡の場合、数十～数百mVの開放電圧の増加が確認できた。開放電圧の増加は距離5 cm程度まで見られ、それ以上の距離ではLED内部での反射光の影響により一定値になる。OSRGHC5B31A（黄緑／赤）とOSRB5131A-C（青／赤）では白色紙でも開放電圧の増加がはっきりと確認できたが、L59SURKSGC（黄緑／赤）とL-519LBHURC（青／赤）では鏡以外の反射対象に対しては明確な開放電圧の増加は見られなかった。



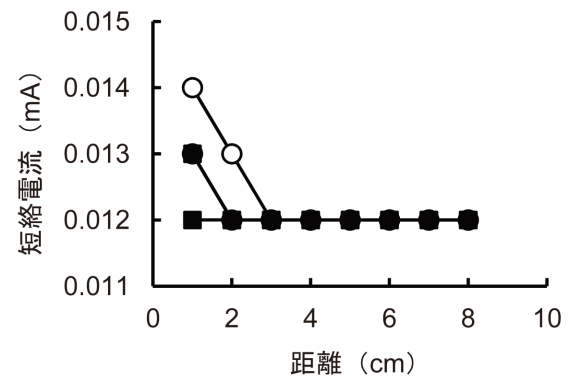
(a) OSRGHC5B31A (黄緑／赤)



(b) L59SURKSGC (黄緑／赤)



(c) OSRB5131A-C (青／赤)



(d) L-519LBHURC (青／赤)

図3. 短絡電流の測定結果

図3は短絡電流の測定結果である。どのLEDにおいても測定された短絡電流は数μA～数十μAで、発光／受光を別個の単色LEDを用いて実験した場合と同程度の値となっている^{9, 11)}。そのため、対象物からの反射光による変化も非常に小さく、使用したデジタル・マルチメータの分解能（1 μA）の数倍程度しかない。このように微弱な（数μA）電流の変化を検出してパソコンに取り込むためには増幅回路や電流／電圧変換回路が必要になる。したがって、できるだけ簡易な構成で2色LEDを光センサモジュールとして使用するためには、短絡電流ではなく、比較的大きな変化が得られた開放電圧を利用する方がよい。そこで以下で報告する障害物検知システムにおいては、白色紙に対して最も大きな開放電圧の変化が見られたOSRB5131A-C（青／赤）を用い、短絡電流ではなく開放電圧の変化を検出するようにした。

3. 2色LEDを光センサとして用いた障害物検知システム

2色LEDの光センサモジュールとしての動作を確認するため、パソコン制御による障害物検知システムを試作した。教材として利用しやすいよう、できるだけ簡易な構成で低コストなものにするため、パソコンのデータ入出力にはKm2Net製USB接続デジタル入出力モジュール

ル (USB-IO 2.0)²¹⁾ を使用した。この入出力モジュールは安価 (1,000円) で販売されており²²⁾, プログラミング言語として広く普及している Microsoft Visual Basic や Excel VBA を使用して比較的容易に制御プログラムを作成することができる。特に Excel VBA を使用すれば測定結果を Excel のシートにそのまま記録できるので, 実験等には便利である。8ビットのポート1と4ビットのポート2の2つのデジタル入出力ポート (パラレル) があり, 各ピンには最大25mA (全ピン合計で80mA まで) の電流を流すことができる。ただしデジタルデータの入出力しかできないため, アナログ電圧の入出力には A/D・D/A コンバータが必要になる。

今回試作するシステムは, 受光側 LED の開放電圧が基準電圧より高いか低いかで障害物の有無を検知するものであるため, A/D コンバータを用いて開放電圧を測定する必要はない。しかし, 検知を行う対象物や周囲の環境に合わせて基準電圧を変える必要があるため, この調整がソフトウェアでできるようにしておくが便利である。そこで D/A コンバータを用いて基準電圧を発生させるようにした。

D/A コンバータは市販の IC を利用することも可能であるが, ほとんどがデジタルデータをシリアル信号として入力するものであり, 取り扱いが容易ではない。そこで本研究では, 2種類の抵抗とプログラムで簡単にできる電圧加算型 D/A コンバータ^{8, 23, 24)} を自作することにした。

この D/A コンバータの回路図を図4に示す。R および 2R の2種類の抵抗をラダー (はしご) 形に組み, USB-IO の出力ポート (ポート1, 8ビット) に接続しただけの簡易な構成となっている。このとき出力電圧 V_{DA} は, ポート1に出力された8ビットのデジタルデータ $a_7a_6a_5a_4a_3a_2a_1a_0$ (各値は「0」または「1」) に対し,

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

で計算される値となる。ここで, V_{CC} はパソコンの USB 端子に供給される電源電圧 (約 5V) である。8ビットすべてが「0」の場合 V_{DA} は 0V, すべて「1」の場合は約 3.3V となり, 「0」と「1」の組み合わせにより, その間を255等分した電圧を出力することができる。

2色 LED (OSRB5131A-C) を含めたシステム全体の回路図を図5に, またユニバーサル基板 (47mm×72mm) を使用して実際に試作した電子回路部分の外観を図6に示す。発光素子である青色 LED には反射光検知特性の測定のとときほぼ同じ約10mA の電流を流すため, アノードに560Ωと300Ωの2つの抵抗を並列接続し, これを通して USB-IO の VCC 端子に接続した。受光素子として使用する赤色 LED には開放電圧の安定化のため3.9MΩの抵抗を並列接続している。障害物検知のための基準電

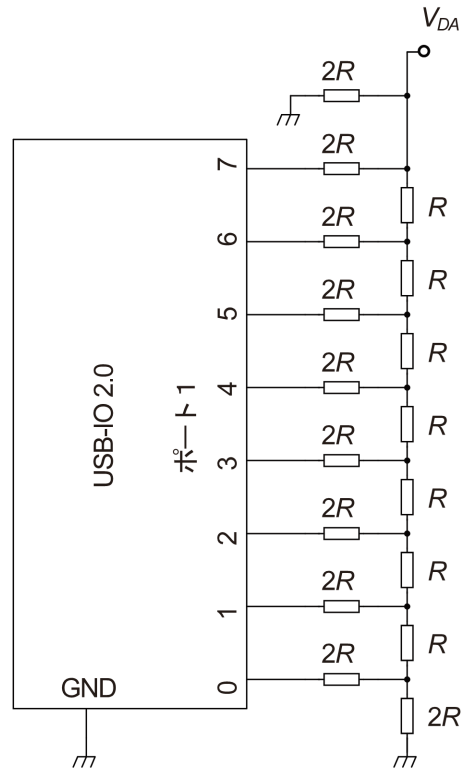


図4. D/A コンバータの回路図

圧は10kΩと20kΩの抵抗ラダー回路による D/A コンバータにより発生させ, この基準電圧と受光素子である赤色 LED の開放電圧をコンパレータで比較するようにしている。なおコンパレータには, 入手しやすい汎用オペアンプ (LM358) を使用した。コンパレータの出力は USB-IO のポート2 (ピン0) に接続されており, 受光用 LED の開放電圧が基準電圧よりも高ければポート2の最下位ビットが「1」, 低ければ「0」になっている。USB-IO 以外はすべて安価で入手が容易な汎用部品であり, ユニバーサル基板を含めても300円程度で購入できる。

このシステムを使用するためにはまず基準電圧を決定する必要がある。前章で報告した通り, LED パッケージ内での反射光のため, 障害物がない場合でも受光用 LED にはある程度の開放電圧が生じる。障害物検知のための基準電圧はこれよりも高く, なおかつ障害物からの反射光が届いた場合の開放電圧よりも低くなければならない。そこでまず室内照明下で白色紙と黒色紙を障害物として使い, 開放電圧を測定した。

この電圧の測定は, Excel VBA により A/D 変換のプログラムを作成して行った。D/A コンバータとコンパレータがあれば, 逐次比較型の A/D 変換を行うことが可能である^{8, 23, 24)}。本システムでは0~約3.3V の電圧を8ビットの分解能 (256段階) で測定することができる。

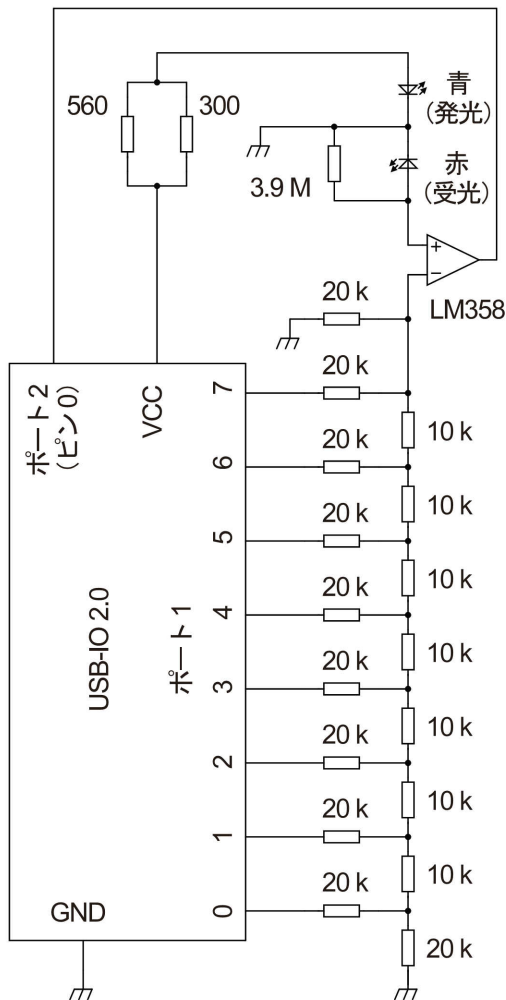


図5. 障害物検知システムの回路図

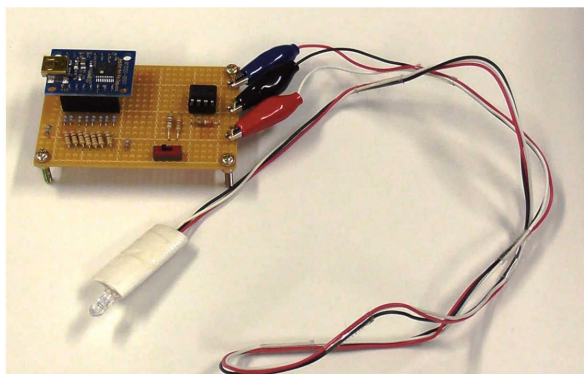


図6. 試作した電子回路部分の外観

測定の結果、白色紙ではデジタル値で105~107（電圧値で約1.4V）、黒色紙では40~60（約0.5~0.8V）の値が得られた。そこで、基準電圧をデジタル値で95（電圧値で約1.2V）に設定し、Excel VBAを用いて障害物検知用のプログラムを作成した。このプログラムを用いて実際に白色紙を障害物として動作させたところ、LEDを距離1cm程度まで障害物に接近させたとき、受光用

LEDの開放電圧が基準電圧を超えたことをパソコンで検知できることが確認できた。

4. まとめ

2色LEDの小型で一体化された光センサモジュールとしての応用の可能性を探るため、反射光検知特性の測定と障害物検知システムの試作を行った。反射光検知特性の測定は、鏡、白色紙、段ボール、黒色紙の4種類の反射対象を用い、4種類の2色LEDについて行った。いずれも、短波長側（青または黄緑色）のLEDを発光素子、長波長側（赤色）のLEDを受光素子とし、対象物からの反射光により受光素子に生じる開放電圧および短絡電流をLEDと対象物との間の距離を変えて測定した。その結果、短絡電流の変化は非常に小さい（数 μ A）ものの、開放電圧の変化はある程度大きく（数十~数百mV）、開放電圧を利用すれば比較的簡易な構成で検知し、その情報をパソコンに取り込むことができることがわかった。そこでこの結果を利用して、パソコン制御の障害物検知システムを試作した。パソコンのデータ入出力には低価格で入手可能なデジタル入出力モジュール（USB-IO 2.0）を用い、またD/Aコンバータは抵抗ラダー回路を利用しているため、簡易で低コストの構成となっている。このシステムにより、室内照明下、距離約1cmで白色紙を検知できることが確認できた。発光/受光素子が一体化された、安価で調整が容易な小型の光センサモジュールとして、教育現場等での応用が期待される。

引用文献

- 1) 根本和昭：LEDを用いたプランク定数の測定実験，物理教育，第49巻，第6号，pp. 545-547（2001）。
- 2) 渡辺智和：LED利用法，物理教育，第52巻，第3号，pp. 249-253（2004）。
- 3) 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）。
- 4) 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）。
- 5) 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）。
- 6) 武藤浩二，横尾仁甚：発光ダイオードを用いた教材の開発及び授業等の実践，長崎大学教育学部教育総合実践センター紀要，第10号，pp. 89-96（2011）。
- 7) 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研究，第28巻，pp. 39-43（2015）。

- 8) 小山英樹, 西村尚大: 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, 兵庫教育大学研究紀要, 第51巻, pp. 73-77 (2017).
- 9) 新保利和, 須田隆夫: 可視光 LED の受光特性に関する研究—双方向通信機の試作—, 鹿児島工業高等専門学校研究報告, 第18号, pp. 69-76 (1984).
- 10) E. Miyazaki, S. Itami, and T. Araki: Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector, Rev. Sci. Instr., vol. 69, no. 11, pp. 3751-3754 (1998).
- 11) 小野寺力, 室谷利夫: 発光ダイオードを用いた光電効果の実験, 応用物理教育, 第32巻, 第2号, pp. 9-14 (2008).
- 12) 長谷川誠: 光通信実験セットにおける受光素子としての発光ダイオードの動作状態の測定, 物理教育, 第63巻, 第4号, pp. 269-272 (2015).
- 13) T. Ozeki, T. Uematsu, T. Ito, M. Yamamoto, and Y. Unno: Half-duplex optical transmission link using an LED source-detector scheme, Opt. Lett., vol. 2, no. 4, pp. 103-105 (1978).
- 14) N. Kashima and S. Ishii: Optical transmission using super luminosity LEDs as a transmitter and a receiver, J. Opt. Commun., vol. 23, no. 5, pp. 165-169 (2002).
- 15) 安倍尚吾, 春山真一郎, 中川正雄: LED を光受信機として使う新方式の検討, 信学技報, OCS2006-77, pp.19-24 (2007).
- 16) 鈴木康祐, 旭健作, 渡邊晃, 小川明: LED を受光素子とする双方向可視光通信に関する基礎的検討, 信学技報, USN2010-2, pp. 5-10 (2010).
- 17) 小山英樹, 高田裕治: 簡易な双方向光通信実験装置, 第72回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, p. 18-047 (2011).
- 18) 高田裕治, 西村尚大, 小山英樹: 会話を体験するための双方向光通信実験装置, 日本産業技術教育学会近畿支部第28回研究発表会講演論文集, pp. 13-14 (2011).
- 19) 高田裕治, 小山英樹: 双方向光通信実験装置の開発と評価, 日本産業技術教育学会第55回全国大会(旭川)講演要旨集, p. 161 (2012).
- 20) 兵庫教育大学大学院連合学校教育学研究科共同研究プロジェクト (P) 研究グループ: イノベーション力を育成する技術・情報教育の展望, ジアース教育新社, pp. 236-245 (2016).
- 21) 小松博史: かんたん! USB で動かす電子工作, オーム社 (2011).
- 22) 秋月電子通商 (株), <http://akizukidenshi.com/> (最終アクセス日: 2018年3月13日).
- 23) 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).
- 24) 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).