

発光ダイオード光センサの性能評価と物理教材への応用

The performance evaluation of the light emitting diode as a photosensor
and application to the physical teaching materials

國光拓実*, 臼井敏男**, 河野託也*

Takumi Kunimitsu, Toshio Usui and Takuya Kohno

*岐阜工業高等専門学校機械工学科, 〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2

**岐阜工業高等専門学校電子制御工学科, 〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2

*Department of mechanical engineering, National Institute of Technology, Gifu College
2236-2 Kamimakuwa, Motosu-shi, Gifu 501-0495 Japan

**Department of electronic control engineering, National Institute of Technology, Gifu College
2236-2 Kamimakuwa, Motosu-shi, Gifu 501-0495 Japan

Abstract

The performance of the LED as a photo detector via photovoltaic effect is evaluated in terms of directivity angle, wavelength-dependent, incident intensity of light-dependent and frequency response. The directivity angle of the device when receiving light is found to be narrower than when emitting light. In the measurement of the frequency response, an acousto-optic modulator is used to provide intensity-modulated light. The response is determined in the range from 1 to 10 kHz. We conducted an experiment that measures the motion of rolling balls using LEDs as photosensors. The measured average acceleration data were consistent with the theoretical value of the experiment. We showed that LEDs can be used as photosensors.

Keywords: photovoltaic effect, LED, photosensor, teaching material

(受理 2015 年 2 月 23 日)

1. はじめに

国際数学・理科教育動向調査の理科に関する意識調査の結果によると, 中学 2 年生の理科の学習に対する意識は, 他国と比べると著しく低い結果となっている⁽¹⁾. そこで, 学生がより工学に興味を持つような授業の工夫や, さらに授業で学習する内容を越え自ら考え積極的に実験学習に取り組める環境を提供することも必要であろう. しかし, 市販されている実験装置は, 用途が決まっているため応用実験への発展が難しい. また, これらの装置は一般的に高価であるため, 故障した際に装置を新しくするには費用がかかり, 学生が授業外の時間に積極的に装置に触れにくい状況になっている. そこで, 安価で整備の行いやすいや

スブルな実験装置を開発すれば, 学生がもっと積極的に実験学習に取り組めるのではないだろうか. これまでに, 安価で取扱い易い発光ダイオード(LED)の光起電力効果の波長依存性や入射光の強度依存性の性能評価⁽²⁾や光起電力効果を利用したプランク定数測定実験装置⁽³⁾が報告されている.

本研究では, LED の受光素子(LED 光センサ)としての指向性や周波数応答特性の性能評価と LED 光センサを利用した斜面を転がる球の加速度測定実験装置の開発を行う.

2. 光起電力効果について

LED は電流を流すことで発光し, 主に照明や表示器

など発光素子として利用されている。また、LED の光起電力効果を利用することで、LED を受光素子として利用可能である。光起電力効果とは、光を pn 接合に照射することで生じる電子・正孔キャリアが接合面付近の内蔵電位により分離する現象である。このキャリアの分離により LED の両端電極には起電力が生じ、光エネルギーを直接電気エネルギーに変換する事ができる。

3. LED 光センサの性能測定評価

3.1 指向性の測定

LED 光センサの指向性を測定評価するために図 1 の測定装置を製作した。この装置は、回転台の上に固定された LED にレーザー光を照射し、光起電力効果により生じた電圧を測定する装置である。回転台の最小目盛りである 2° ずつ台を回転し、LED に入射するレーザー光の角度を変え、指向性の測定を行った。

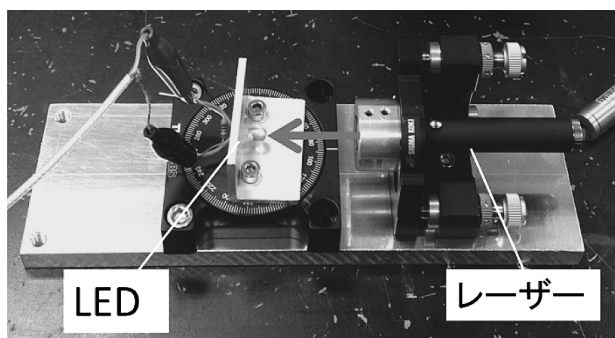


図 1 指向性測定装置

図 2 は発光波長 570 nm の LED(OSNG5113A)の測定により得られた入射光の角度と出力電圧の関係を表したグラフである。グラフ横軸の入射角度 0° は、出力電圧の最大値となった角度である。視野角を出力電圧が最大値の半分の値となった角度範囲とすると、測定された LED の視野角は約 4° である。発光視野角は同測定装置で測定した結果より約 20° である。この値は、LED スペックシートの発光視野角 15° と比べ同程度の結果である。受光の視野角は発光の視野角に比べ 0.25 倍狭くなっている事が分かる。また、入射角度に対して、出力電圧が非対称のグラフとなった。これ

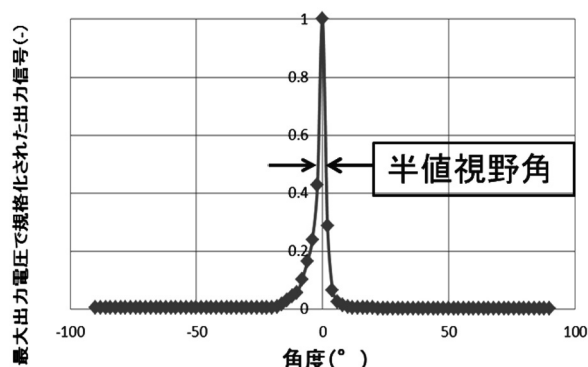


図 2 入射光角度と出力電圧

らの原因は LED の構造によるものと考えられる。

図 3 はランプ型 LED の構造の模式的図である。LED チップから放出される光は、pn 接合の接合面の空乏層から四方八方に広がる。チップ上面から斜めに出た光やチップの側面からの光を効率よく上側に光が反射されるように、チップ側面の周りは光を反射するように斜めにカットされた反射板になっている⁽⁴⁾。受光の際は、逆に pn 接合の接合面にリフレクターを介して光が入射しなければ光起電力が生じないため、視野角が狭くなったと考えられる。また、LED を 90° 回転させた状態で測定を行ったが、指向性の結果が少し異なったことから LED の構造の非対称性がグラフの非対称性に関係していると考えられる。

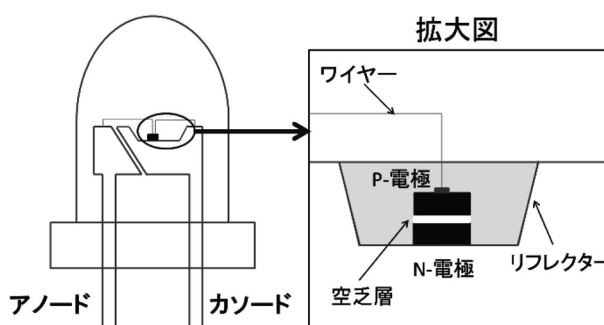


図 3 ランプ型 LED の構造

3.2 波長依存性の測定

波長依存性は、7 種類の発光波長の異なる LED(OSIR5113A(940nm), OSDR5113A(640nm), OSYL5113A(590nm), OSNG5113A(570nm), OSUB5111A-ST(470nm), OSV6YL5111A(415nm), NSPU510CS(375nm))に 5 種類の波長(1117, 780, 650, 532,

405nm)のレーザー光を照射し、出力電圧を測定した。波長依存性についてはすでに報告があるように⁽²⁾、7種類の LED のいずれも発光波長よりも長い波長のレーザー光では電圧が生じない事が確認できた。しかし、発光波長よりも短い波長のレーザー光を照射した場合でも OSDR5113A, OSIYL5113A については光起電圧が生じなかった。これは、LED チップのサイズが小さいためレーザー光の一部しか受光されず、入射光強度が弱いと信号が出にくかったと考えられるので、入射光を強くすることで信号が確認できるはずである。

3.3 入射光の強度依存性の測定

入射光の強度依存性は、波長依存性の測定実験と同時に行った。入射レーザー光の強度は、ND フィルターによって強度を変え、最大強度の 2 割まで減衰させ出力電圧を測定した。入射光の強度と出力電圧の関係もすでに報告があるように⁽²⁾、出力電圧は入射光の強度に比例して大きくなる事が確認できた。しかし、強度が弱い時には比例するが、高強度の場合には出力電圧が飽和し一定値になるはずである。

3.4 周波数応答特性の測定

周波数応答特性は図 4 の測定装置を構成した。LED の周波数応答測定は、音響光学素子(AOM)を利用し、発振波長 532 nm の入射レーザー光の光強度に変調を与え行った。AOM ドライバーから AOM に方形波の信号を与えた状態で、AOM を通過したレーザー光は回折される。その回折した+1 次光だけが LED に入射される。+1 次光の光強度は、AOM ドライバーに外部から入力される発振器の周波数に応じた ON/OFF の強度変化をする。実験では、発振器の周波数に応じた LED の光起電力の応答を測定した。

図 5 は AOM ドライバーに入力した外部発振器の出力信号(上)と LED の光起電力信号(下)である。図(a)は入力周波数が 1 Hz、図(b)は 2 kHz の時の LED の光起電力波形である。図(a)は、入力信号とほぼ同じ光起電力波形が得られている。一方、図(b)の入力周波数が 2 kHz の場合は、入力信号波形と比べ歪んだ波形出力を示している。

図 6 は発光波長 570 nm の LED(OSNG5113A)の周波数応答特性を表したグラフである。縦軸は LED の出力電圧幅 V_1 (入力信号が 1Hz 時の出力電圧幅)と出力電圧幅 V_2 (入力信号の周波数を上げた時の出力電圧幅)との

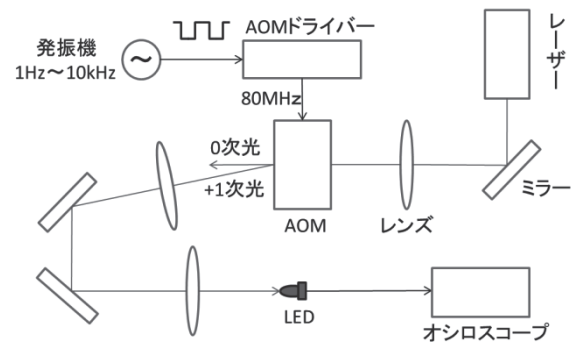
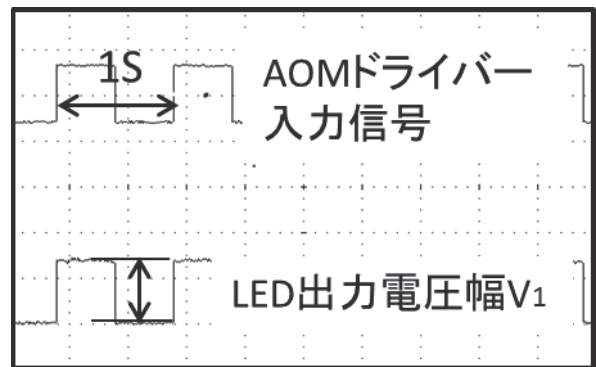
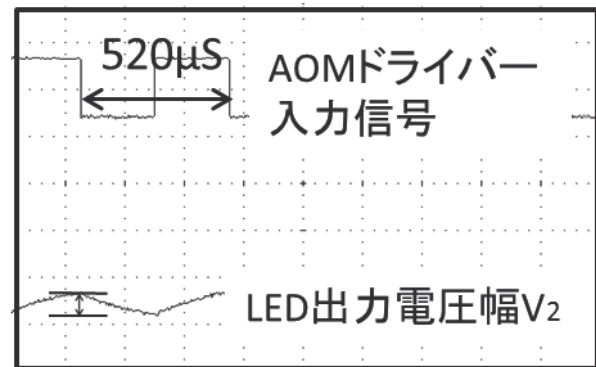


図 4 周波数応答特性の測定装置



(a) 1 Hz 時の電圧信号



(b) 2 kHz 時の電圧信号

図 5 電圧測定データ

比の対数値(相対出力)である。相対出力の減衰が-3dBとなるカットオフ周波数は約 2 kHz である。

4. 斜面を転がる球の加速度測定実験装置

図7はLEDを光センサに用いた斜面を転がる球の加速度測定実験装置の構成である。LEDをセンサとして用いたのは、指向性の性能測定評価の結果より、受光面が小さく視野角が狭いためフォトダイオードなどに

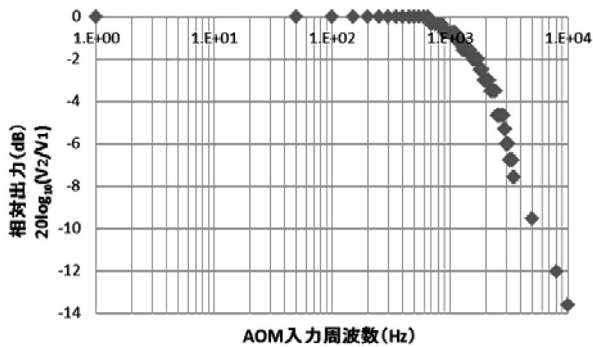
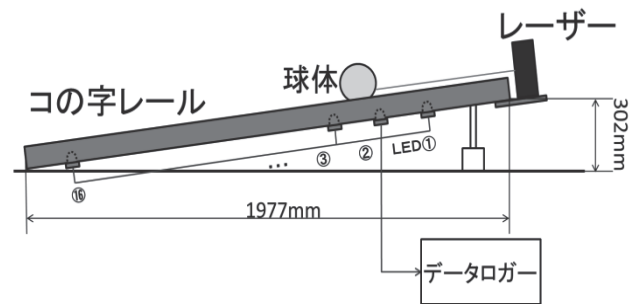


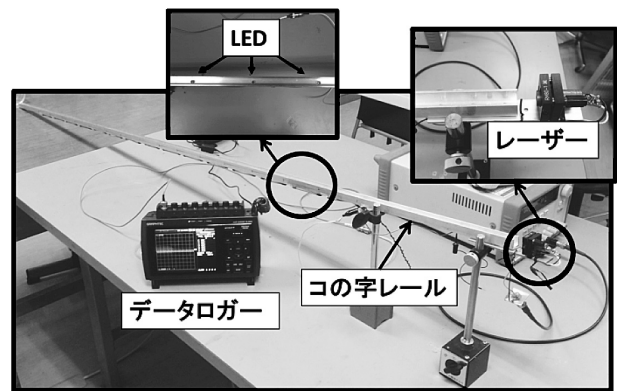
図6 AOM 入力周波数と相対出力

比べ、球の位置がより正確に判定できるからである。アルミ製コの字型レール(断面の外形寸法: 15×15 mm, 厚み: 2.0 mm)には約一定間隔 100 mm 毎に 16 個の LED 光センサ(OSNG5113A)が 1.5 m にわたり並列に取り付けられ、データロガー(GRAPHTEC: midi LOGGER GL900)と接続されている。レール上を転がり落ちる球体の背面から波長 532 nm のレーザー光が照射され、球体で反射されたレーザー光はレールに取り付けられた LED 光センサで受光される。その際、レーザー光が転がる球の一定の位置に当たり続けるために、レーザー光とレールが平行になるように調節を行う。また、レーザー光が反射しやすいよう球には反射率の高いメッキを施したステンレス球 $\phi 15$ (舟辺精工: 13.73 g)と $\phi 12.7$ (8.334 g)を用いた。光起電力効果によって LED に発生した光起電圧をデータロガーで読み取り、最大電圧が発生した時間と LED 間の距離から加速度を計算する。

図8はレールを水平面から 8.7° に傾けたレール上をステンレス球 $\phi 12.7$ を転がし得られた実験結果である。横軸はデータ点数(時間経過に相当)、縦軸は LED 出力電圧を表す。出力電圧の 16 個のピーク値は球体が各 LED 上を通過したことを示す。ピーク値とピーク値の間の時間間隔が変化している様子から、速度が変化していることが分かる。データロガーの計測間隔は 500 μs である。ピーク値から隣のピーク値のデータ点数に 500 μs をかけた値がその LED 間を通過した時間となる。例えば、LED ①と LED ②のピーク間のデータ点数が 498 個であり、これに 500 μs をかけた 0.25 秒が LED 間を通過する時間となる。各 LED の間隔は約 100 mm なので、球の速度は、この時間間隔と LED 間距離の比から計算できる。図9は図8の測定結果より得られたステンレス球 $\phi 15$ と $\phi 12.7$ の速度変化を示したグラフである。グラフの横軸は LED 通過数を示している。例



(a) 模式図



(b) 装置の構成

図7 加速度測定実験装置

えば、通過数2における速度は、LED ①と LED ②の間の通過時間と間隔から計算される。プロット点は 10 回行った実験の平均速度で、プロット点にはバーで偏差も示されているが 1~20mm/s 程度と球体の速度に比べ小さいので見えなくなっている。図 10(a)と(b)は、それぞれ図9より求めたステンレス球 $\phi 15$ と $\phi 12.7$ の加速度を示したグラフである。図 10 のプロット点は 10 回行った実験の平均加速度、プロット点のバーは標準偏差、実線は全体の実験値平均値、破線は理論値を示している。この結果から、加速度の実験値平均は理論値計算⁽⁶⁾とほぼ一致しているが、各 LED 間における加速度のばらつきが大きい事が分かる。表1は $\phi 12.7$ と $\phi 15$ のステンレス球の加速度理論値、全体の実験平均値と実験標準偏差を示している。ステンレス球 $\phi 12.7$ のほうが $\phi 15$ よりも実験平均値の偏差が小さい。このことから、各 LED 間の実験値のばらつきの要因の一つは、レールの自重と球の重みによりレールがたわむことで、まっすぐな斜面でなく球の位置により時間的に斜面が湾曲するためである。レールのたわみを小さくするためには、レールの材質、構造の変更、球の大きさの変更を行えばよい。

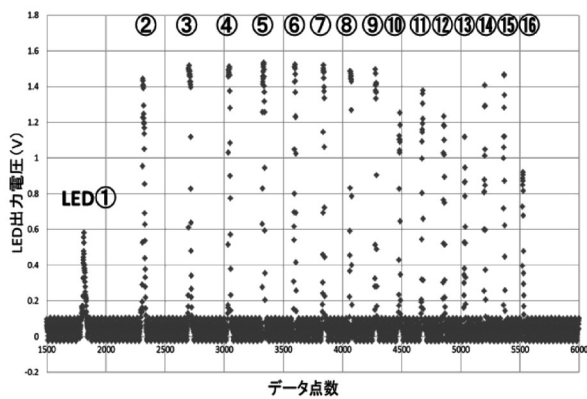


図8 測定データ

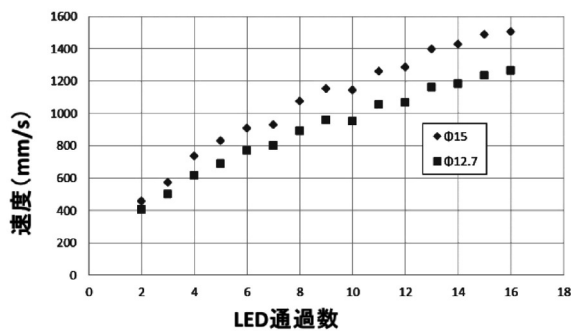
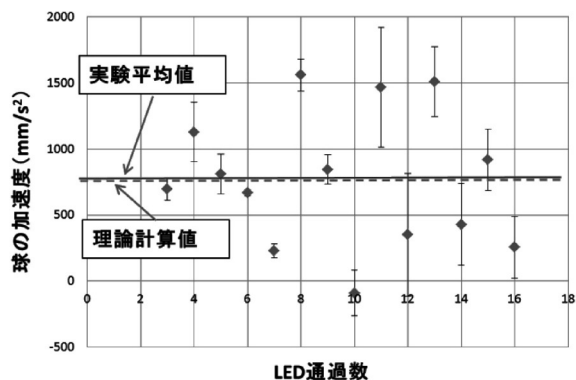
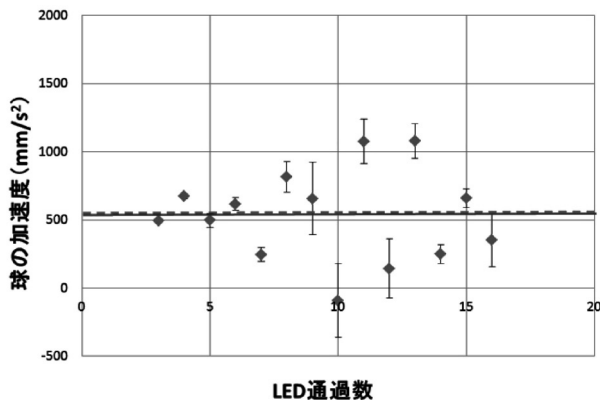


図9 各LED位置における速度



(a) φ15の場合



(b) φ12.7の場合

図10 各LED位置における加速度

表1 球の直径と加速度の実験結果

球直径(mm)	理論計算値(mm/s ²)	実験平均値(mm/s ²)	標準偏差(mm/s ²)
12.7	541	533	323
15	748	770	494

5. まとめ

LED光センサの性能評価と斜面を転がる球の加速度測定実験装置の開発を行った。LED光センサの波長依存性と入射光の強度依存性の結果より、光起電力効果の性質の確認を行うと共に、指向性と周波数応答性の評価を行った。測定したLEDに関して、受光の指向性は発光時より狭い事が分かった。周波数応答特性については、カットオフ周波数は約2 kHzである事が分かった。

斜面を転がる球の加速度測定実験装置の結果より、実験平均値は理論計算値と良く一致した。LEDにおける光起電力効果を利用すれば、LEDを位置センサや運動センサなどの光センサとして利用できることが分かった。

参考文献

- 1) IEA 国際数学・理科教育動向調査の2011年調査
<http://www.nier.go.jp/timss/2011/>
- 2) 小野寺力, 吉田雅昭: 応用物理教育, 32 (2), p. 9 (2008).
- 3) 小野寺力, 吉田雅昭: 応用物理教育, 33 (2), p. 23 (2009).
- 4) 長谷川竜生, 釜野勝, 上原信知: 図解入門よくわかる最新LEDの基本と仕組み, (秀和システム, 2012).
- 5) 山本逸郎, 古川由美子, 弘前大学教育学部紀要, 第96号, p. 27-40 (2006).