

# LEDへの印加電圧によるプランク定数の推定

天本 徳浩\* 上野 賢仁\*\*

## Estimation of Planck's constant by the voltage applied to the LED

by

Tokuhiro AMAMOTO\*, Takahito UENO\*\*

### 要 旨

光は屈折や干渉といった波動特有の現象を示すが、波動性では説明できない現象も示す。金属に光を照射すると、金属内の電子が光からエネルギーを受けて飛び出す現象があり、これを光電効果という。この現象は光の粒子性を説明する現象として古くから物理学実験や講義の中での演示実験として利用されてきた。この現象を利用してプランク定数を推定する実験を2015年から取り入れてきた。しかし、いくつかの問題点もあり、近年のLEDの普及は目覚ましいものがあることから、LED発光の仕組みの理解、さらにはLEDから出る光の振動数と印加電圧の関係からプランク定数を推定する手法を実験に取り入れることを試みるものである。

**Key Words** : LED、プランク定数、光子、発光開始電圧

### 1. はじめに

物理学実験では、問題とする物理現象や法則が関係するように条件設定された実験装置を用いて、得られた結果から問題を確認する。

光電効果によるプランク定数決定の実験は、教養課程の物理学実験テーマとして多数の大学で採用されてきた。しかし、市販の装置（光電管式）を用いて得られるプランク定数の値は、測定誤差として許容範囲を逸脱しており、様々な課題を含んでいると報告されている<sup>1)</sup>。著者らも光電効果による学生実験を導入したが、学生実験での結果も十分なものとは言えない<sup>2)</sup>。また、近年は一般社会においては素子の小型化が進み、真空管はトランジスタ（集積回路を含

む）へ、光電管などの光センサーもフォトダイオード（フォトトランジスタやCCD）などの半導体が使われるようになってきている。

本研究ではLEDの発光ピーク周波数の測定と発光開始電圧（LEDが光り始めたときにLEDに印加されている電圧）の関係からプランク定数を推定するための実験手法を確立し、学生実験である物理学実験に取り入れられるか検討した。

根本は<sup>3)</sup>、 $E_g = h\nu$ という式にあてはめたバンドギャップ $E_g$ と振動数 $\nu$ の傾き $h$ （プランク定数）がLEDの数を増やすと2つに分かれることを示した。この考え方はグラフが原点を通るという前提で結果が導き出されている。

三門は<sup>4)</sup>、発光開始電圧とLEDの光起電力の両面からプランク定数を推定した。ここで、発光開始電圧と振動数には線形関係はあるが、比例関係ではないことが確かめられている。

\*崇城大学総合教育センター准教授

\*\*崇城大学総合教育センター教授

小野寺らは<sup>5)</sup>、発光開始電圧と振動数が比例関係ではなく切片を持つ線形関係である原因をLEDの特性によるものと仮定して、電圧電流特性について検討した。この中で様々なLEDの特性を把握したうえで実験に用いるべきであると述べている。

いずれの文献でも波長ごとに1つのLEDのみを測定対象としており、LEDの個体差について分析しているものはない。本研究では市販の明るさや波長が異なる26種類のLEDを選択して、発光開始電圧と波長の関係からプランク定数を推定する。使用したLEDは表-1のとおりである。同波長のLEDも複数個を対象として発光開始電圧を測定することによりLEDの設計や個体差についての分析もできる。波長はデータシートから得られたドミナント波長である。

## 2. 実験の原理

### (1) LEDの発光原理

LEDは、一組のPN接合を持つ半導体素子で構成されている。図-1のように、p型半導体のアノード電極に+、n型半導体のカソード電極に-になるように外部から電圧をかけると、p型半導体のホールが+から-に向かって流れ、n型半導体の電子が-から+に向かって流れる。すると、pとnが接合する部分で伝導帯にある電子が価電子帯にあるホールに再結合する。この時の伝導帯と価電子帯のエネルギー差であるバンドギャップのエネルギーが光として放出される。

LEDの発光色は、使われる基板の材料で決まり、材料ごとに持っている価電子帯と伝導帯のバンドギャップ（もしくは禁制帯幅と呼ぶ）のエネルギーの大きさによって決まる。

図-2はその模式図である。p-n接合でのホールと電子の結合は電子がエネルギーの高い伝導帯からエネルギーの低い価電子帯に落ちることによっておこる。このエネルギー差が大きいほどよりエネルギーの高い光、即ち波長の短い光が放出される。

表-1 実験に使用したLED一覧

番号	色	型番	波長 (nm)	明るさ (mcd)
1	青	OSUB5161A-PQ	470	5800
2	青	OSUB5161P	470	8400
3	青	OSUB5111A-ST	470	10000
4	青	OSB56L5B61Y	470	12000
5	青	OSB56P5111A	470	18000
6	青	OSB56A5111A	470	20000
7	青緑	OSBG5111A	505	8000
8	緑	OSG5GP5111A	525	100
9	緑	OSPG5161A-RS	525	8400
10	緑	OSG59L5B61Y	525	35000
11	緑	OSG58A5111A	525	45000
12	黄	OSY5EA5B61A-	590	7000
13	黄	OSYL5111A-TU	590	12000
14	黄	OSY5CA5B61P	590	19000
15	黄	OSY5CA5111A-	590	22000
16	黄	OS5YKA5111A	590	50000
17	橙	OSO5CA5111A	605	37500
18	橙	OS5OAA5111A	605	60000
19	橙	OS6OGA5111A	610	75000
20	赤	OS5RKA5111P	624	75000
21	赤	OS5RPM5B61A-QR	625	7000
22	赤	OS5RPM5111A-TU	625	12000
23	赤	OSR5CA5B61P	625	19000
24	赤	OS5RKA5B61P	625	48000
25	赤	OS5RKA5B61Y	625	48000
26	赤	OSR7CA5111A	660	15000

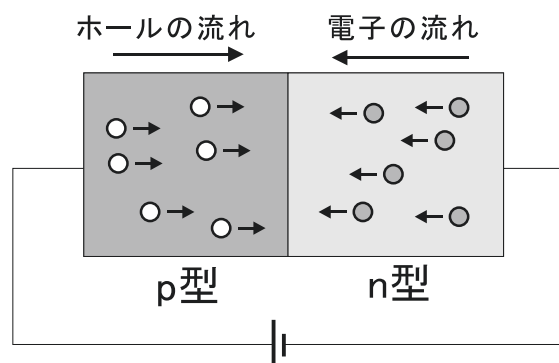


図-1 LEDの仕組み

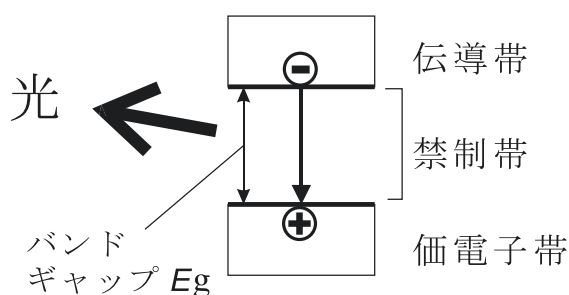


図-2 LEDの発光原理

## (2) 実験の理論

バンドギャップのエネルギーを  $E_g$  とすると発光する光の振動数  $\nu$  は

$$E_g = h \cdot \nu \text{ という形であらわされる。}$$

ここで、 $h$  はプランク定数である。

しかし、文献4) 5) で示されるようにエネルギーギャップ  $E_g$  と発光起電力には何らかの差があり (LEDの材質の特性によるもの、LEDの内部抵抗によるものなどが考えられる)、比例関係ではなく、線形関係を前提として関係式を考える。

ここで、発光起電力を  $V_s$  とすると

$$V_s \cdot e = h \cdot \nu - \varepsilon \quad (1)$$

このように表すことができる。

ここで、 $e$  : 電子素量、 $h$  : プランク定数、 $\nu$  : 振動数、 $\varepsilon$  : 切片である。

## 3. 測定

### (1) 実験装置

電圧を可変できる安定化電源に電流調整用の抵抗とLEDを直列につなぎ、電流計と電圧計を図-3のように接続した。ここで使用した抵抗の抵抗値は  $100.5 \Omega$  である。

安定化電源は KIKUSUI PMX18-2A で電圧を  $0.05V$  刻みで可変できる。電流計は  $0.01\mu A$  まで、電圧は  $0.001V$  まで読み取れるデジタル式である。型番は電流計が SANWA PC7000、電圧計は SANWA PC710 を用いた。回路の接続状況は図-4のとおりである。回路はブレッドボードを用いて、LEDの交換をしやすくした。また、できるだけLEDの発光を感度よく観察するために図-5のようにLEDに筒をかぶせて外

部の光を遮断した。発光開始の判断は筒の端に目を当て、電圧を徐々に上げていき人の目で光ったと判断できた時を光り始めと決定した。ほんの少しの変化でも視認できるため人の目はとても感度の良いセンサーだといえる。ただし、観察中に電圧を上げすぎて明るくしすぎないということが注意点である。

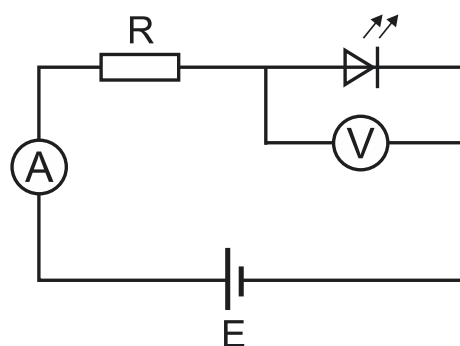


図-3 実験の回路

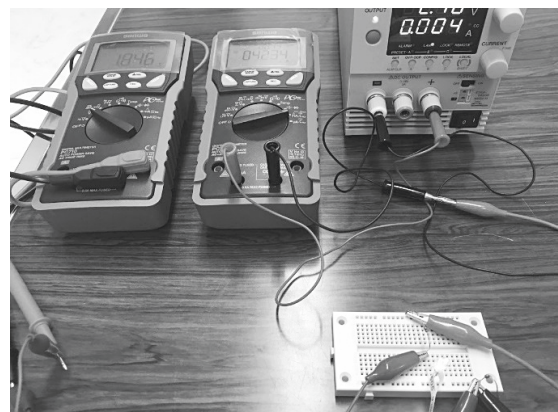


図-4 実験回路の写真



図-5 発光の確認状況

## (2) 測定

ブレッドボードに対象となるLEDを差し込み、発光開始電圧を測定する。発光を確認できた時の電流はほとんどの場合 $1.0\mu\text{A}$ 以下であった。 $1.0\mu\text{A}$ を超えたのは4つで、表-1の番号4、5、13、20である。青が2種、黄が1種、赤が1種で材料の特性だけが原因ではないようである。番号4のLEDは $2.26\mu\text{A}$ 、番号5は $1.07\mu\text{A}$ 、番号13は $1.16\mu\text{A}$ 、番号20は $1.09\mu\text{A}$ であった。

$1.0\mu\text{A}$ 未満の電流で光ったLED(図-6)と $1.0\mu\text{A}$ を超えて光ったLED(図-7)の電圧電流特性のグラフを示す。 $1.0\mu\text{A}$ 未満の電流で光ったLEDは番号25、赤色、光り始めの電圧は $1.348\text{V}$ 、その時の電流は $0.76\mu\text{A}$ であった(図-6)。また $1.0\mu\text{A}$ を超えたLEDは番号4、青色、光り始めの電圧は $2.096\text{V}$ 、その時の電流は $2.26\mu\text{A}$ であった(図-7)。

文献4)では発光開始電圧について $0.5\mu\text{A}\sim 5.0\mu\text{A}$ までの差異が報告されている。

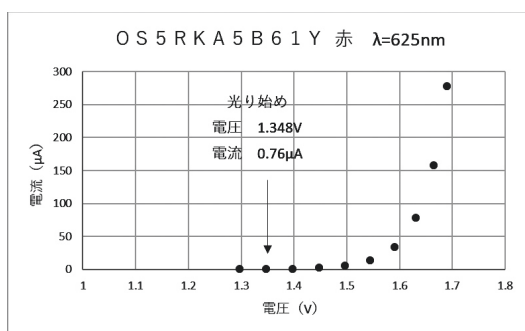


図-6 番号25のLEDの電圧電流特性

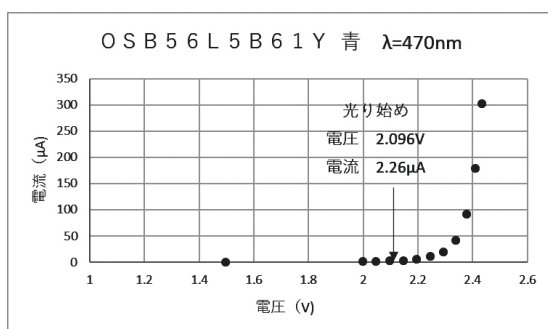


図-7 番号4のLEDの電圧電流特性

特に発光波長が短かければ電流値が大きくなるというような傾向は観察できなかった。

測定結果の一覧を表-2に示す。

表-2 発光開始電圧と電流ほか

番号	色	波長 (nm)	電圧 (V)	電流 ( $\mu\text{A}$ )	振動数 (Hz)	eV(J)
1	青	470	2.097	0.81	6.38E+14	3.36E-19
2	青	470	2.097	0.74	6.38E+14	3.36E-19
3	青	470	2.097	0.72	6.38E+14	3.36E-19
4	青	470	2.096	2.26	6.38E+14	3.36E-19
5	青	470	2.097	1.07	6.38E+14	3.36E-19
6	青	470	2.097	0.70	6.38E+14	3.36E-19
7	青緑	505	2.047	0.80	5.94E+14	3.28E-19
8	緑	525	1.847	0.69	5.71E+14	2.96E-19
9	緑	525	1.847	0.68	5.71E+14	2.96E-19
10	緑	525	1.797	0.71	5.71E+14	2.88E-19
11	緑	525	1.887	0.73	5.71E+14	3.02E-19
12	黄	590	1.497	0.84	5.08E+14	2.40E-19
13	黄	590	1.497	1.16	5.08E+14	2.40E-19
14	黄	590	1.497	0.83	5.08E+14	2.40E-19
15	黄	590	1.487	0.80	5.08E+14	2.38E-19
16	黄	590	1.447	0.71	5.08E+14	2.32E-19
17	橙	605	1.397	0.75	4.96E+14	2.24E-19
18	橙	605	1.439	0.88	4.96E+14	2.31E-19
19	橙	610	1.398	0.82	4.91E+14	2.24E-19
20	赤	624	1.398	1.09	4.80E+14	2.24E-19
21	赤	625	1.397	0.88	4.80E+14	2.24E-19
22	赤	625	1.333	0.81	4.80E+14	2.14E-19
23	赤	625	1.349	0.66	4.80E+14	2.16E-19
24	赤	625	1.348	0.76	4.80E+14	2.16E-19
25	赤	625	1.348	0.76	4.80E+14	2.16E-19
26	赤	660	1.297	0.93	4.54E+14	2.08E-19

## 4. プランク定数の推定

26種のLED発光開始電圧に電子素量をかかけたエネルギーと振動数の関係をプロットしたものが図-8である。関係式より求められたプランク定数は $7.67 \times 10^{-34} \text{Js}$ との精密値の $6.63 \times 10^{-34} \text{Js}$ と大きく異なり、17%ほど大きくなった。

グラフから読み取ると同じ波長のLEDであっても発光開始電圧が一定ではないことがわかる。文献5)によると回路の接点やLED内部の抵抗により発光開始電圧に影響を及ぼしている可能性があることが指摘されている。特に緑

の525nmの波長のLEDでは発光開始電圧のばらつきが大きかった。一方で青の470nmの波長のLEDについては、ほぼ同じ発光開始電圧であった。

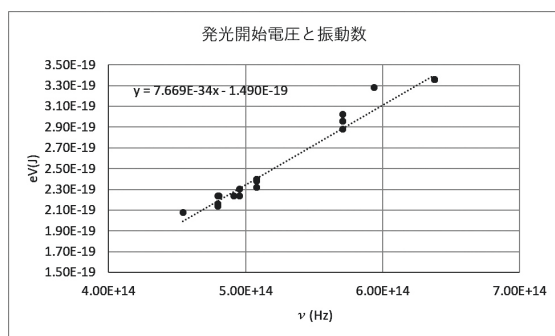


図-8 発光開始電圧と振動数によるプランク定数の推定

## 5. おわりに

プランク定数を求める実験としては十分な結論は得られなかったが、光電管を使用して光電効果から得られるプランク定数に比較すれば十分な精度の値が求められたといえる。この状況でも学生実験に取り入れることは可能であるが、問題点もある。またLED素子のバラツキや材料の違い、内部抵抗の存在などにより、発光開始電圧とバンドギャップの電圧に違いがあることは明確になった。これを明らかにすることが今後の課題である。さらに、今回はLEDの波長としてデータシートのドミナント波長を用いたが、LEDの波長には幅があり、発光開始電圧は定格電圧よりも低いため、発光開始電圧時の波長は長めになっている可能性もある。発光開始時の波長について確認することが必要であると考えられる。

## 謝辞

本論文を作成するにあたって、元崇城大学講師永野先生にはLEDとプランク定数との関連性についてヒントをいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 平野延章, 岩堀純一郎: 高知医科大学一般教育紀要第1号 (1986), p. 43-46
- 2) 天本徳浩, 上野賢仁, 町田光男: 物理学実験への新実験種目の導入 - 光電効果の実験によるプランク定数の決定 -, 崇城大学紀要第41巻 (2016), p. 179-183
- 3) 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6号 (2001), p. 545-547
- 4) 三門正吾: LEDを量子分野教材とすることについての考察と実験, 物理教育第56巻第2号 (2008), p. 117-120
- 5) 小野寺力, 吉田雅昭: LEDの電圧電流特性の検討, 物理教育第59巻第3号 (2011), p. 212-215

