

# 小型電子器機のワイヤレス充電に関する一検討

内山 直美 (東北大学 大学院工学研究科, n-uchiyama@ecei.tohoku.ac.jp)

山田 博仁 (東北大学 大学院工学研究科, yamada@ecei.tohoku.ac.jp)

## A study on wireless charging system for small electronic devices

Naomi Uchiyama (Department of Communications Engineering, Tohoku University, Japan)

Hirohito Yamada (Department of Communications Engineering, Tohoku University, Japan)

### 要約

近年、さまざまな種類の小型電子機器の普及に伴いワイヤレス充電(給電)の研究が盛んにおこなわれているが、新規手法として光ワイヤレス充電の研究が進められている。光ワイヤレス充電は、主に送信器にレーザーやLEDのような光源、受信器に太陽電池のような受光素子を用いる方式である。安全面に制約のないLEDの研究事例は少ない。本研究では、室内でよく使われる赤外線リモコンの光ワイヤレス充電の方式について検討した。その結果、小型の結晶Si太陽電池セルと蓄電デバイスを内蔵すれば、近赤外LEDからの光により室内においても動作可能となる十分な電力量が蓄電され、乾電池レスにできることがわかった。

### キーワード

光無線給電, 太陽電池, LED, 乾電池レス, 光ワイヤレス充電システム

## 1. はじめに

### 1.1 背景

近年、Internet of Things (IoT) システム等の普及に伴い小型電子機器のワイヤレス充電(給電)の需要が高まっている。ワイヤレス充電方式には、『電磁誘導型』、『磁界共鳴型』、『電波受信型』がある。これらの方式には電磁干渉や電波防護等、電波法による制約があり、その課題解決が重要となる。一方、新しい方式として『光ワイヤレス充電』がある。光ワイヤレス充電とは、送信側にレーザーやLEDのような光源、受信側に太陽電池のような受光素子を用いる方式である。光は電波と同じ電磁波であるが、電波法による制約がない。光源に近赤外光を用いることによる特徴は以下に挙げられる。

- 不可視領域のため、昼夜を問わず充電可能。
- 長波長のため、蛍光灯のような可視光に比べ距離に対して散乱されにくく、遠くまで届きやすい。
- LEDを用いることで、レーザーや電波では実現困難な室内利用が可能。

受光素子には、室内用太陽電池として普及しているアモルファスSi太陽電池の場合、近赤外領域に感度がないため、感度のある結晶Si太陽電池を用いる必要がある。

光ワイヤレス充電の主な研究事例としては光源にレーザーを使用した屋外利用が多く、ドローンのような無人飛行体への給電があげられる。室内利用には安全面に制約のないLEDが望ましいが、距離を離れた場合の充電の研究事例は少ない。LED光はレーザー光と異なり拡がりがあり、距離が離れるにつれ減衰し、放射照度が弱くなるためである。しかし、光の拡がりを逆手にとると、図1に示す室内利用イメージのように、エリア内であれば複数のデバイスを同時充電することも

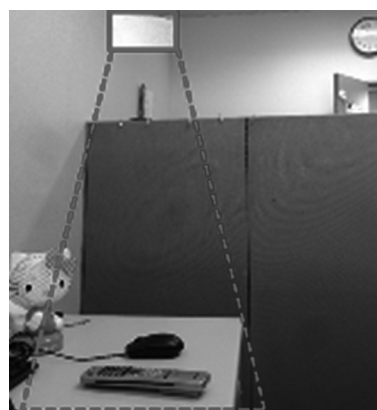


図1：室内利用イメージ

可能となる。室内でよく使われるものの例としてテレビやエアコン等の赤外線リモコンがある。乾電池で駆動するが、電池寿命の前に液漏れし、使えなくなることが多い。

本研究では、光源にLEDを使用した室内利用の一例として、赤外線リモコンを乾電池レスで使うための光ワイヤレス充電方式を提案する。光源から受光素子までの距離を1～3mで想定し、光源に近赤外LED、受光素子に近赤外光に感度がある結晶Si太陽電池を用いて検討した。

## 2. 実験と結果

### 2.1 赤外線リモコンのスペック調査

身近にある赤外線リモコン3種(A～C)についてボタン操作時の消費電力を調査した。いずれも乾電池2本使用されて

表1：各種赤外線リモコンの動作電力

	リモコンA	リモコンB	リモコンC
乾電池	単4型2本	単3型2本	単3型2本
定格電圧(V)	3	3	3
動作電流(mA)	約25	約30	約40

いることから定電圧電源を3Vに固定し、ボタン押下時の電流値を測定した。その結果を表1に示す。最大でも150mW程度であることがわかる。リモコンボタンを操作する時間は長くても1日1分程度であるとする、1日当たりの消費エネルギーは10J程度である。リモコンAについては、2.89V以上ないと主電源が入らなかった。

## 2.2 LEDの使用波長の検討

LEDの使用波長を検討するにあたり、受光素子として使用予定である市販の結晶Si太陽電池(単セル・ペア:39×19mm)のスペクトル感度を調べた。表面と裏面にタブ線をハンダで配線し、図2のようにおよそ1cm角となるようマスクした。スペクトル感度の測定にはハイパーモノライトシステム:SM-250GDT型(分光計器株式会社)を使用した。図3の結果より、汎用の近赤外LEDとして比較的入手しやすい波長領域である850nmと940nmに感度があることがわかった。

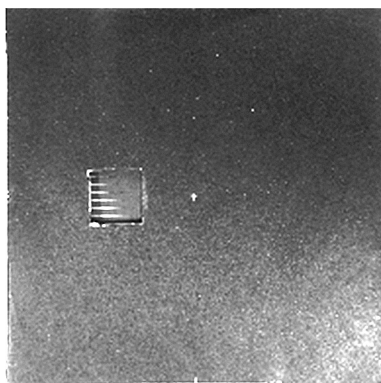


図2: 結晶Si太陽電池セルの外観  
注: およそ1cm角となるようマスクした。

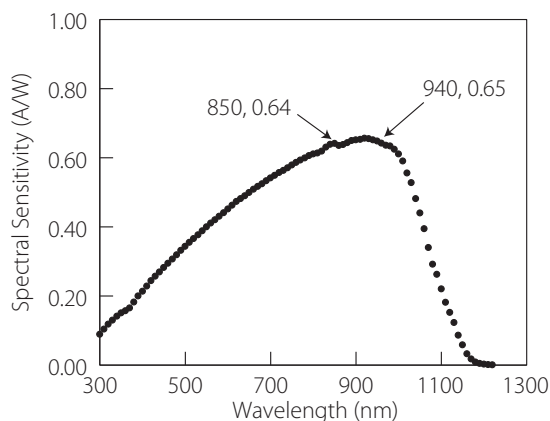


図3: 結晶Si太陽電池のスペクトル感度

次に、850nmと940nmの各単一波長のLEDを用いて、図2に示した太陽電池セルの電流電圧(IV)特性を調べた。光源は図4に示すように2波長とも市販の高出力アレイ型LED(Hontiey High Power LED)をヒートシンクに固定し使用した。20×20mm内にLEDチップが10×10チップ並んだものである。LEDの放射照度はパワーメーター8230(ADCMT)で測定し、放射照度を統一するためおよそ54mW/cm<sup>2</sup>とした。LED

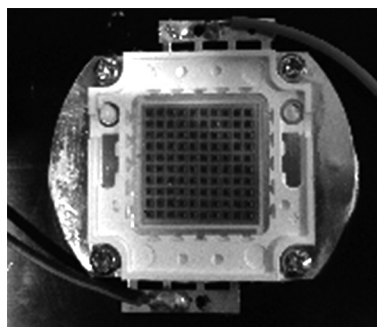


図4: 高出力アレイ型LEDの外観

表2: LED側発光電力

nm	LED側発光電力			放射照度 mW/cm <sup>2</sup>
	V	A	W	
940	13.5	2.89	40	54
850	14.1	0.96	13	54

と太陽電池の距離は50mmとした。IV特性は太陽電池セルに可変抵抗器を接続し、抵抗を変えながら各デジタルマルチメーターの値を読み取った。IV特性はそれぞれ3回測定した。LED及び、太陽電池の温度上昇を防ぐため、卓上扇風機やエアコンでコントロールした。太陽電池セルの温度は熱電対を用い、25±1℃の範囲で測定した。結果を図5に示す。電流値に若干差がみられたものの、開放電圧に明瞭な差はみられなかった。そのため、LED側の発光電力についても比較検討した。2波長のLEDの放射照度は前述と同じおよそ54mW/cm<sup>2</sup>で統一し、LEDと太陽電池セルの距離も50mmとした。表2に比較した結果を示す。同じ放射照度を得るのに、850nmは13W程度であるのに対して940nmは40Wであった。

したがって、省電力である850nmLEDを用い、さらに放射照度をあげるため26Wの発光電力で使用することにした。

## 2.3 850nmにおけるIV特性の距離依存性およびLED光の照度分布

LEDと太陽電池との距離を離すと放射照度が低下するため6.7インチのフレネルレンズ(Edmund #32-593、焦点距離f:

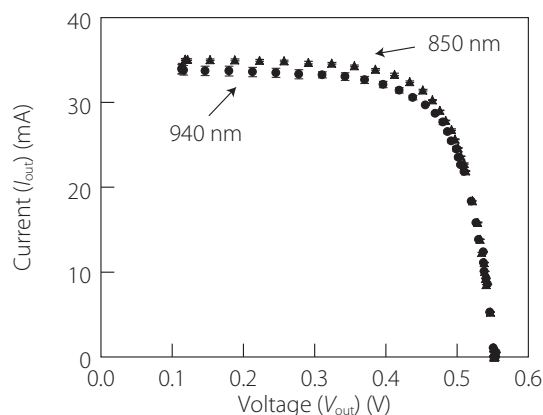


図5: 結晶Si太陽電池のIV特性

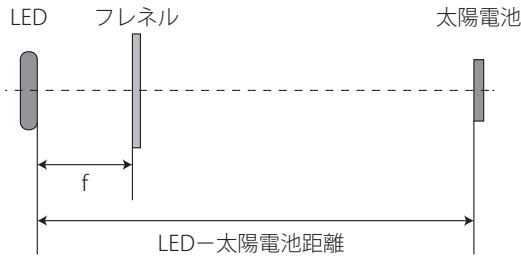


図6：測定系上面図

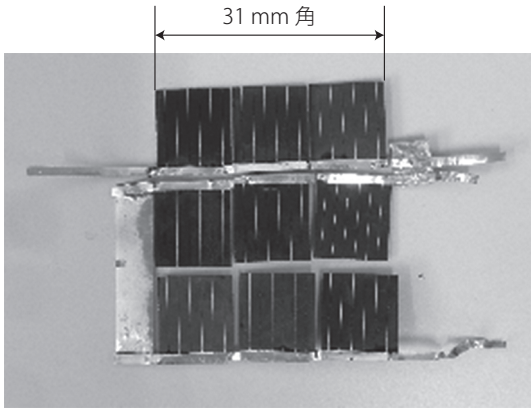


図7：9直列太陽電池

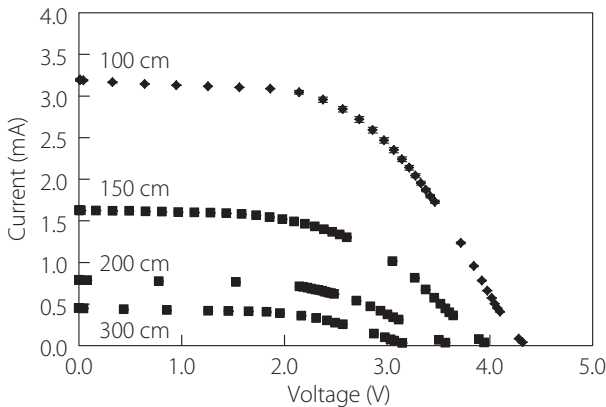
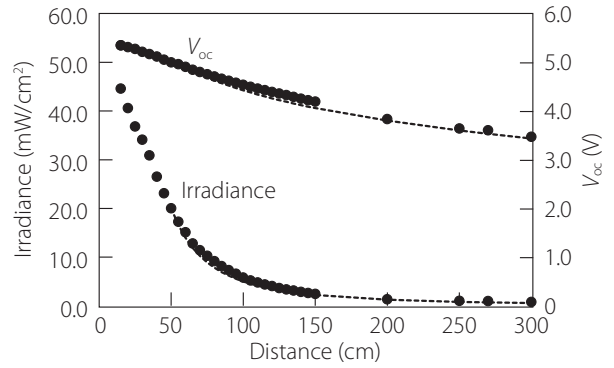


図8：850 nmにおけるIV特性の距離依存性

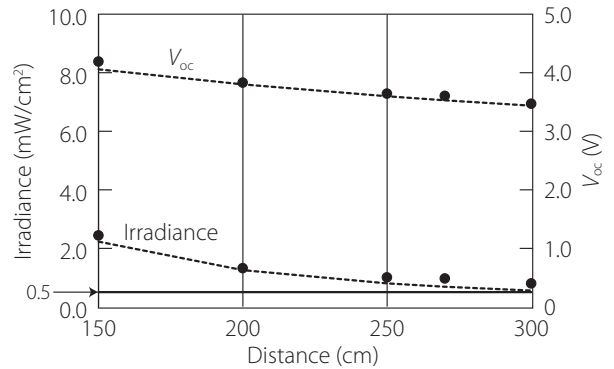
76.2 mm) で集光した。図6に測定系上面図を示す。また、図5からわかるように、単セルだと電圧が0.55 V程度で足りないため、図7のようにインターコネクタ以外のセル面積がおよそ1 cm<sup>2</sup>となるようダイシングし、9直列に接続した。850 nmにおけるIV特性の距離依存性を図8に、放射照度と開放電圧の距離依存性を図9に示す。また、図10に各距離におけるLEDの照度分布を示す。

## 2.4 蓄電器

蓄電器には鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池のような二次電池からキャパシタまで様々な種類があるが、本研究では電気二重層キャパシタを使用した。主な特徴は以下のとおりである。



(a)



(b)

図9：放射照度と開放電圧の距離依存性

注：距離150～300 cm付近を拡大。

- ・ 小型で高い静電容量を持つ(1～数F)。
- ・ 原理的に酸化還元反応を用いないため繰り返し充電に強い。
- ・ 長寿命で無保守。
- ・ 充放電時間が短い。

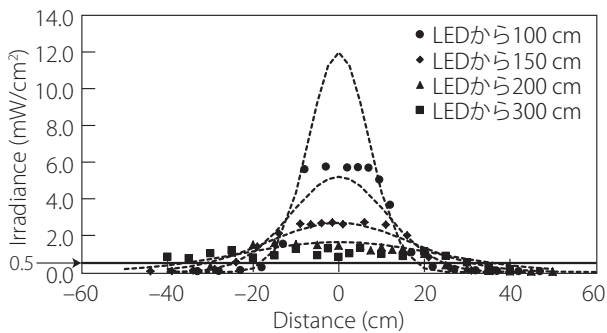
図11にワイヤレス充電回路を示す。 $R_s$ は太陽電池側直列抵抗、 $r_s$ 、 $r_p$ はそれぞれキャパシタ側の直列抵抗、並列抵抗である。出力0.15 W、3～4 Vの範囲内で60秒連続使用すると仮定し、(1)式よりキャパシタ容量C (F)を見積もった。ここでP (W)はボタン操作出力、t (sec)はボタン操作時間、 $E_c$  (V)は充電電圧、 $E_1$  (V)はボタン操作後電圧である。

$$C = \frac{2 \times P \times t}{(E_c^2 - E_1^2)} \quad (1)$$

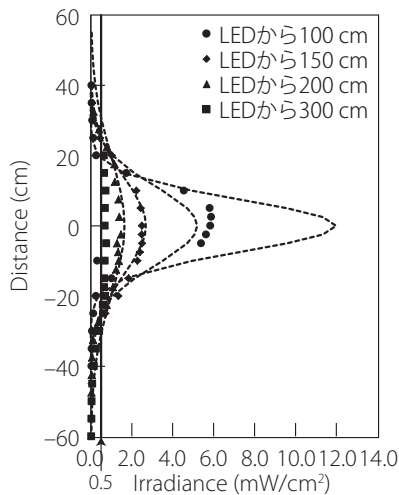
$C \approx 2.57$  Fと計算されたが、電気二重層キャパシタの耐電圧がリモコンの定格電圧3 Vに耐えるものが身近になかったため、耐電圧5.5 V、静電容量1 Fを使用した。

## 2.5 充電特性

LEDと太陽電池との距離1 m、2 m、3 mにおける充電特性の結果を図12に示す。リモコン駆動の目安である電圧3 V到達に必要な時間は1 mだと太陽電池出力電圧 $V_{out} \approx 4.5$  Vで充電すると約13分、2 mでは $V_{out} \approx 3.6$  Vで約1時間、3 mでは



(a) X軸



(b) Y軸

図10：X軸とY軸方向の照度分布

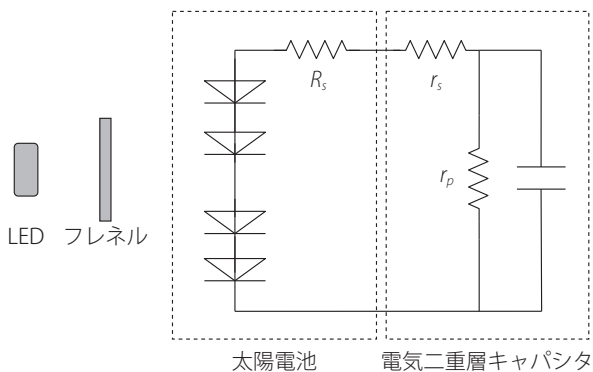


図11：ワイヤレス充電回路

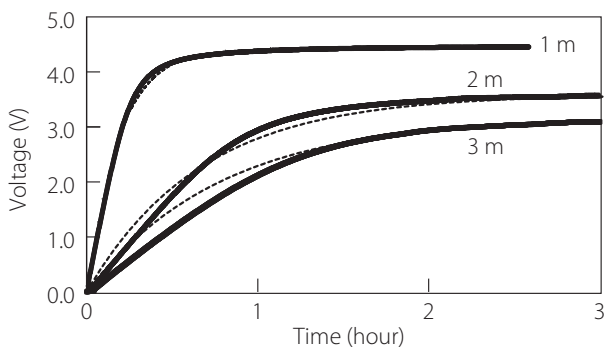


図12：キャパシタの充電特性

$V_{out} \approx 3.2$  Vで約1時間20分であった。太陽電池出力電圧は外部抵抗なしでほぼ開放電圧であった。

自然放電特性の測定系を図13に、結果を図14に示す。太陽電池を取り外すと自然放電し始めた。

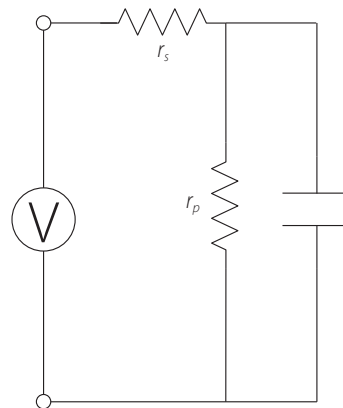


図13：放電特性測定系

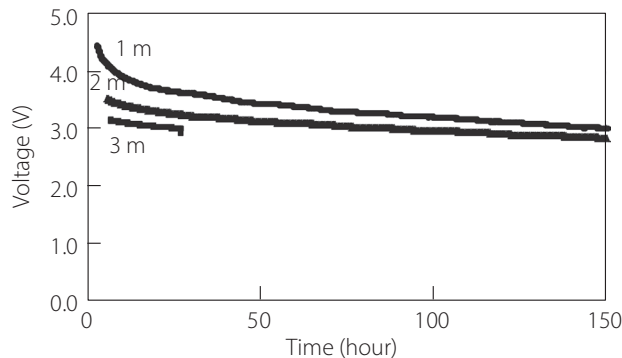


図14：キャパシタの自然放電特性

### 3. 考察

#### 3.1 LEDの使用波長の検討について

##### 3.1.1 太陽電池の電流値について

単接合太陽電池の場合、太陽光スペクトルに対する短絡電流密度 $J_{sc}$ は(2)式のように全波長における光子流量を積分すると計算できる。

$$J_{sc} = q \int F_{ph}(\lambda) \gamma(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

ここで、電子の電荷 $q$  (C)、波長 $\lambda$  (nm)における光子流量 $F_{ph}(\lambda)$ 、(外部)量子効率 $\gamma(\lambda)$ とする。この式から単一波長の場合、光子数 $N_{ph}$ は、放射照度 $W$  ( $W/cm^2$ )、プランク定数 $h$  ( $J \cdot s$ )、光速 $c$  (m/s)とすると、(3)式であらわされる。この式から光子流量は波長のほか、放射照度に比例することがわかる。

$$N_{ph} = \frac{W\lambda}{hc} \quad (3)$$

図5のIV特性では波長により若干の差がみられた。図3のスペクトル感度を外部量子効率に変換すると、図15のように

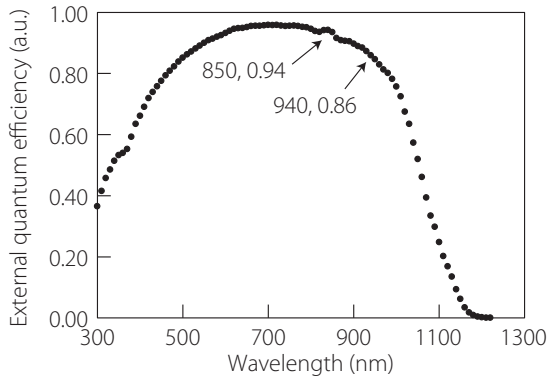


図15：結晶Si太陽電池の外部量子効率(EQE)

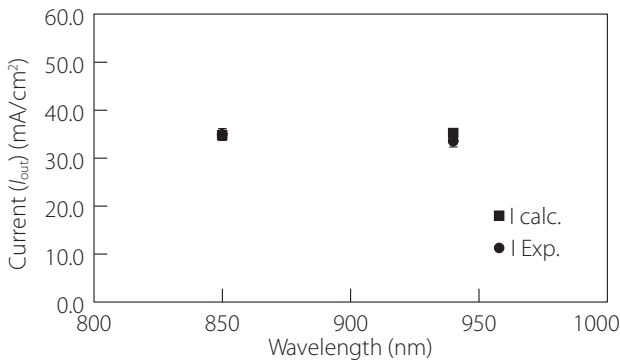


図16：電流密度の計算結果と実験結果

なる。量子効率とはフォトンが電子1個分の電流を生む確率のことである。外部量子効率と(2)、(3)式を用いて計算した結果と実験結果を図16に示す。フォトン数は850 nmより長波長である940 nmのほうが多いが、外部量子効率では850 nmの値が0.94と良かったため、全体で見ると波長による差はわずかとなった。

### 3.1.2 太陽電池の電圧値について

一般に、開放電圧 $V_{oc}$ は(4)式であらわされる。 $n$ はダイオード係数、 $k$ はボルツマン定数、 $T$ は絶対温度(K)、 $I_0$ は逆飽和電流である。

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right) \quad (4)$$

この式より $V_{oc}$ は短絡電流 $I_{sc}$  ( $J_{sc}$ )の自然対数に比例するため、波長依存性はほとんどないことがわかる。

### 3.1.3 光源について

LED光には940 nmの場合、距離を離すと発光電力に対する放射照度に限界があった。これは、現在主流のGaAs系の940 nmの高出力LEDでは、製造工程のいかにによって本質的に発光しにくいことがわかっている。使用波長は太陽電池の電流電圧の差が大きくなかったことから、光源の発光のしやすさから検討すると850 nmが適していた。また、850 nmという波長は実用では防犯カメラや顔認証でも使用されてお

り、入手もしやすい。

人体に及ぼす影響としては、『JISC 8154 (2015) 22 光生物学的安全性』の言葉を引用すると『赤外放射は、安全性評価を表示しなければならないレベルに達しないので、測定は不要』とあるため現状問題ないとする。ただし、通常の光源の場合と同様に考えて、発光部を長時間見る等は避けるべきである。

図10よりフレネルレンズを用いた場合、光源に近い100 cmあたりまではコリメートされており、おおむねレンズの大きさの照度分布を示していた。一方、200 cm以上になると光の拡がり角の影響から放射照度は弱まるものの、照射範囲は広がっていた。計算の結果、拡がり角はおよそ0.2 radとなり、2 mの位置で $\Phi$ 66 cm、3 mの位置で $\Phi$ 92 cmの範囲内で3 V以上確保できると予測できた。

### 3.1.4 充電について

キャパシタの充電特性は(5)式で表される。 $E_c$  (V)は充電される電圧、 $E$  (V)は回路に印加される電圧、 $t$  (sec)は充電時間、 $R$  ( $\Omega$ )は抵抗、 $\tau$  (sec)は時定数である。

$$E_c = E \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right] \quad (5)$$

この式から充電スピードは回路に印加される電圧、すなわち太陽電池の出力電圧(外部抵抗なしのほぼ開放電圧)に律速される。

追加充電特性についても調べた。図17に2.83 Vまで電圧が低下した後、距離2 mで追加充電した場合の充電特性を示す。約6分で3 Vに達した。このことから、0 Vから充電するより随時充電したほうが3 Vに達する時間が早いことがわかる。

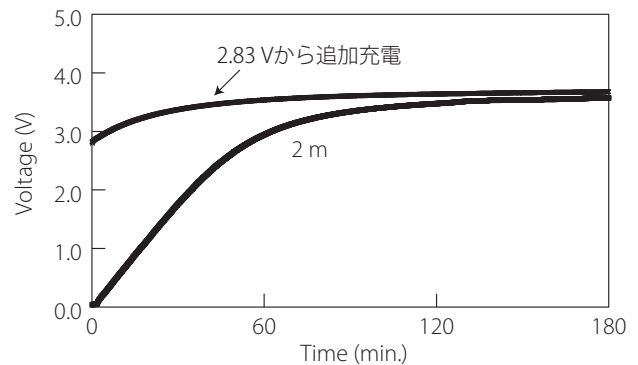


図17：距離2 mにおける2.83 Vから追加充電特性

図18に自然放電した場合と(6)式を用いて計算した場合の結果を示す。自然放電した場合、リモコン駆動限界2.9 Vに達する時間は1 mで約4日と22時間、2 mで約2日と12時間、3 mで約1日と4時間と見積もることができた。このことから自然放電は問題にならないと言える。

$$E_c = E \left[ \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right] \quad (6)$$

仮に、ボタンを操作し続けた場合の放電特性の計算結果を

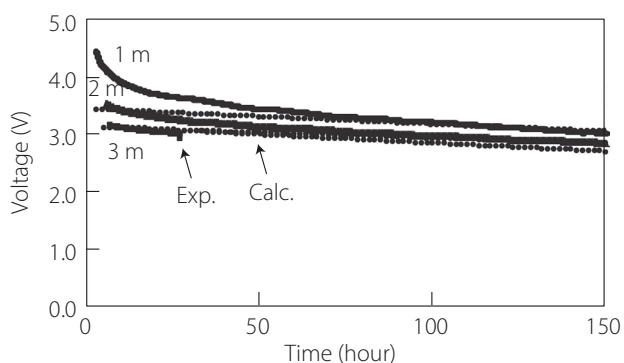


図 18：キャパシタの自然放電特性

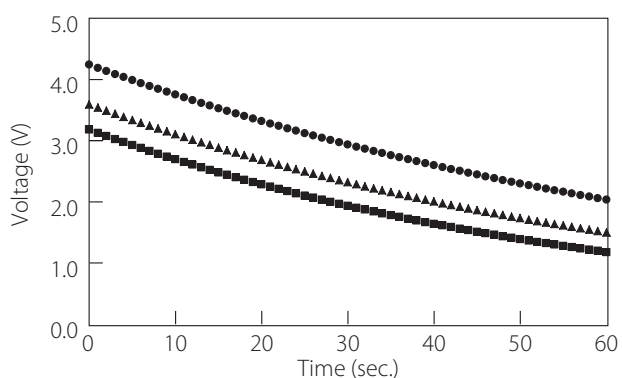


図 19：ボタン操作続けた場合の放電特性

図 19 に示す。初期の充電電圧とキャパシタ容量に依存する。今回使用した 1 F の電気二重層キャパシタでは、LED と太陽電池との距離 1 m で約 30 秒、2 m で約 14 秒、3 m で約 5 秒まで使用可能であると予測できた。

#### 4. 結論

本研究で、150 mW 程度の赤外線リモコンの室内における近赤外 LED による光ワイヤレス充電が十分可能であることが分かった。また、乾電池の代用として電気二重層キャパシタが使用でき、乾電池レス化できることがわかった。

#### 謝辞

本研究の一部は、東北大学流体科学研究所の設備をお借りすることで実現しました。寒川教授をはじめとする彼らのご厚意に深く感謝申し上げます。

また、研究の上で貴重なアドバイスをいただいた研究室メンバーに深く感謝申し上げます。

#### 引用文献

- Costanzo, A., Dionigi, M., Masotti, D., Mongiardo, M., Monti, G., Tarricone, L., Sorrentino, R. (2014). Electromagnetic energy harvesting and wireless power transmission: A unified approach. *Proceedings of IEEE*, Vol. 102, No. 11, 1692-1711.
- Fakidis, J., Videv, S., Kucera, S., Claussen, H., and Haas, H. (2016). Indoor optical wireless power transfer to small cells at nighttime. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, 3236.

- Garnica, J., Chinga, R. A., and Lin, J. (2013). Wireless power transmission: From far field to near field. *Proceedings of IEEE*, Vol. 101, No. 6, 1321-1331.

JIS C 8154 (2015). 22 光生物学的安全性.

- Kitabayashi, H., Kawabata, Y., Matsubara, H., Miyahara, K., and Tanaka, S. (2010). Development of high optical output power infrared light emitting diode. *SEI Technical Review*, No. 70, 71.

下岡浩 (2008). 新エネルギーの展望 二次電池 改訂版. 財団法人エネルギー総合工学研究所.

- Shoki, H. (2014). Trends, technical and regulatory problems, and standardization for commercialization of wireless power transmission technologies. *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*. 1095-1097.

武田和也・河島信樹・矢部恭一 (2008). レーザーエネルギー伝送の小型無人飛行体への応用. *宇宙技術*, Vol. 7, 27-32.

- Zhou, Y. and Miyamoto, T. (2019). 200 mW-class LED-based optical wireless power transmission for compact IoT. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 58, SJJ04.

(受稿：2019年12月23日 受理：2020年1月20日)