

室内照明による高効率環境発電デバイスと自立電源の開発

奥 良彰

ローム(株)

🔑 エナジーハーベスタ, 色素増感型太陽電池 (DSC), 自立電源, 無線センサネットワーク

1. はじめに

今後、普及が見込まれる無線センサネットワークにおいて、本格的な普及への大きなボトルネックとなるのが各センサ・通信ノードへの電力供給である。現在の有線電力供給、電池駆動に替えて、周囲の環境から電力を生み出すエナジーハーベスティング (Energy Harvesting : EH) デバイスを電力源として用いることができれば、メンテナンスフリーな永続的駆動が可能となるだけでなく、電源工事が不要となり、煩わしさや工事費用が低減され、大きく普及することが期待できる。屋内の微弱な照明下でも効率よく発電できる自立電源モジュールを開発し、これによる永続的なセンサと無線送信の駆動を実現する。具体的には本グリーンセンサネットワーク・システム技術開発プロジェクトで開発されるグリーンセンサにより中小オフィスの省エネ化を達成するための無線センサネットワークへの電源供給を実現する超小型高効率屋内用自立電源を開発する。

2. 屋内用高効率環境発電デバイスの開発

2.1 環境発電デバイス

EH 技術には光、振動、温度差、電磁波を利用する技術のほか、生体の化学反応を利用するものまであり、対象となるエネルギー源はさらに広がりつつある。一方、無線センサネットワークに用いられる、センサ・マイコン・無線通信の各種デバイスの消費電力は年々低減しており、EH デバイスで駆動可能なアプリケーションは今後、さらに広がってくることが予測される。

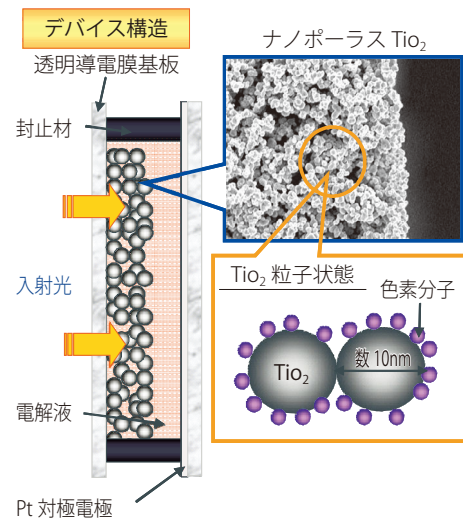
EH デバイスの中でも色素増感太陽電池 (Dye-sensitized Solar Cell : DSC) は、室内光下での発電量が大きく、カラフルかつシースルー化が可能で意匠性に優れる特徴を有している。室内用途としての DSC の高効率化には微弱な室内照明エネルギーのロスを抑えなければならぬ。その為には DSC セルのロスをいかに低減するかがポイントになる。

図 1 に DSC のデバイス断面構造図を示す。2 枚の電極付基板、色素分子を吸着させた比表面積の非常に大きなナノポーラス酸化チタン (TiO_2)、電解液と封止材から構成

されるシンプルな構造である。入射光側の基板の電極は透明電極である必要があるが、もう一方の基板の電極も透明電極であればシースルーカラーを呈する DSC を形成することが可能となる。

図 2 は DSC の等価回路であり、ここで注目すべきは直列抵抗 (R_s) とシヤント抵抗 (R_{sh}) であり、これらによって光発電特性がどのように変わるかを発電時の電流密度 (J) - 電圧 (V) 特性によって以下に説明する。ちなみに R_{sh} は光発電デバイスのリークのしやすさ (逆電流の流れやすさ) を示す。

図 3 は発電特性を示す J - V グラフであるが、 x 切片を開



ナノポーラス TiO_2 構造で色素吸着率が増加

図 1 DSC のデバイス構造図

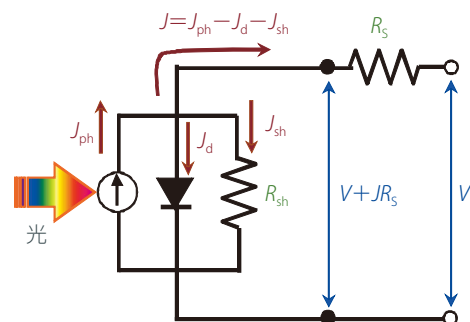


図 2 光発電デバイスの等価回路

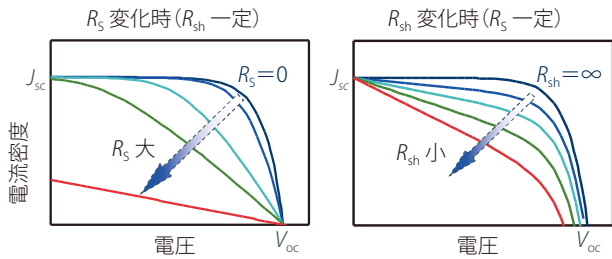


図3 光発電デバイスの発電特性の R_s , R_{sh} 依存性

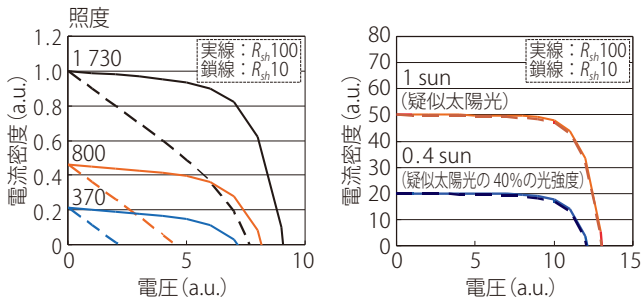


図4 屋内光下 (左) と太陽光下 (右) での光発電特性の R_{sh} 依存性

放電端電圧 (V_{oc}), y 切片を短絡電流密度 (J_{sc}) と呼び、曲線の形状因子は FF と呼ばれ、最大出力を P_{max} とすると、 $FF = P_{max} / (J_{sc} \times V_{oc})$ の関係式で与えられる。発電特性を向上させるには、 V_{oc} , J_{sc} , FF をそれぞれ大きくする必要があります。

例えば、図3の左側のグラフが示すように、 R_{sh} が一定値の場合、 R_s が0から大きくなるほど、 J_{sc} と FF が小さくなるのが分かる。一方、図3の右側のグラフが示すように、 R_s が一定値の場合、 R_{sh} が無限大から小さくなるほど、 V_{oc} と FF が小さくなるのが分かる。つまり、直列抵抗低減とシャント抵抗増大 (リーク低減) が V_{oc} , J_{sc} および FF 改善の鍵である。

さらに、直列抵抗 (R_s) が一定の場合、室内光下と太陽光下で R_{sh} をそれぞれ $1/10$ に小さくした場合にどの程度、光発電特性の照度依存性に影響するかを計算した結果が図4の左側のグラフである。室内光の場合、 R_{sh} を $1/10$ にすることで低照度にした場合の V_{oc} 低下が顕著であることが分かる。一方、太陽光の場合、同様に R_{sh} を $1/10$ にしても光発電特性 ($J-V$ 特性) はほとんど変わらない (図4の右グラフ)。このことは逆に言えば、太陽光発電では問題とならないレベルのリーク電流 (逆電流) が室内光発電では大幅な電圧低下を引き起こすといえる。

2.2 屋内用光発電デバイスの高効率化

2.1での議論を受けて、DSCの逆電流を低減する方策の一例を紹介する。ロスの一因である電極基板表面と電解液の間に流れる逆電流を抑制するためにチタニア前駆体水液

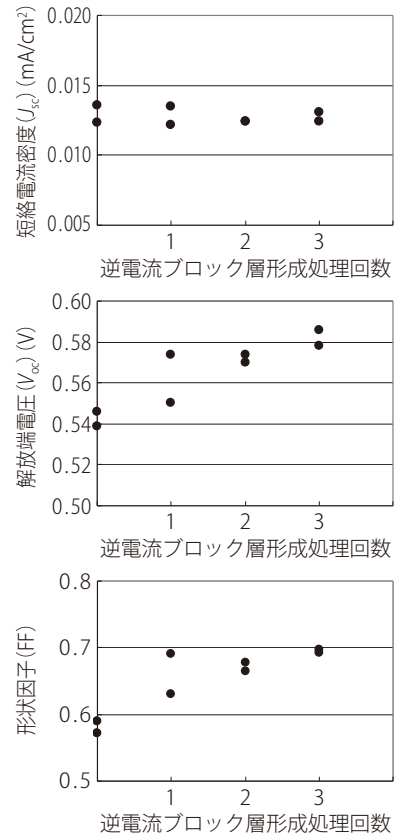


図5 J_{sc} , V_{oc} , FF の逆電流ブロック層形成処理回数依存性 ($N=2$)

液処理を施し、蛍光灯 200 ルクス環境下での J_{sc} , V_{oc} および FF の処理回数依存性を評価した結果が図5である。処理回数とともに、 J_{sc} を変化させることなく、 V_{oc} および FF が増大しており、これは図3の右側のグラフでの R_s 一定において、 R_{sh} を増大させた結果と符合する。

本処理を3回実施することで、 V_{oc} および FF が最大それぞれ 8.7% および 22% 増大し、 $V_{oc} \sim 0.58$ V および FF ~ 0.70 を得ることができた。

3. 超小型高効率屋内用自立電源の開発

3.1 低リーク電流電気二重層キャパシタ

屋内で高効率に光発電が可能となれば、この発電量をキャパシタないしバッテリーへ高効率で蓄電し、無線センサネットワーク端末の駆動に用いることとなる。屋外の太陽光発電の場合、Si 太陽電池に2次電池として Li イオン電池を組み合わせることが多いが、筆者らは、本プロジェクト発足以前より、DSC に電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor : EDLC) を組み合わせることで数々の実証を行ってきている。これは、屋内環境下では、通常の Si 太陽電池よりも DSC の方が大きな発電量が得られる点と、2次電池は充電においてしきい値があるため、低電圧

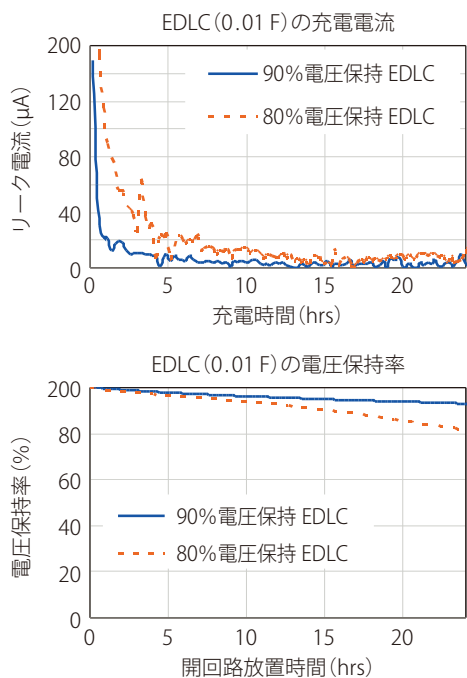


図6 EDLC (0.01 F) のリーク電流と電圧保持率の一例

からの充電が困難であるのに対して、EDLC では原理的に 0 V 以上から充電することが可能である点からエネルギー密度の低い屋内照明環境に適合していると考えられるからである。また、EDLC は Li イオン電池に比べて内部抵抗が低いことから、比較的大きな電流を消費する無線デバイスに直結して駆動させることも可能であり、よりシンプルなシステム構成が可能であるともいえる。

しかしながら、一般的に EDLC は絶縁抵抗が低いために、リーク電流が大きく、電圧保持率が Li イオン電池よりも低い。そこで、低い内部抵抗を維持しながら、低リーク電流で電圧保持率の高い EDLC を開発している。図6 は EDLC のリーク電流の要因となる活物質の剥離を抑制した結果、容量 0.01 F の EDLC において、充電開始 24 時間後の到達リーク電流を $10 \mu\text{A} \rightarrow 1.0 \mu\text{A}$ ($0.05 \mu\text{A} / \text{cm}^2$) 程度まで低減させた結果であり、それにより、電圧保持率が 80% から 90% に増大した一例である。オフィスでのグリーンセンサネットワーク実証を考えた場合、夜間・休日時の蓄電容量の低下がアプリケーションによっては課題となり得るため、電圧保持率の高い（低リーク電流）EDLC を開発する必要があると考えている。

3.2 自立電源 POC ボードの試作と動作検証

屋内の微弱な光環境でも効率よく発電が可能な低逆電流 DSC を開発し、DSC からの微小電力を効率よく蓄電できる低リーク電流 EDLC を開発し、上記 DSC および EDLC と高効率 DC / DC コンバータを組み合わせた屋内向け光発電蓄電ボード（自立電源 POC (Proof Of Concept, 概念

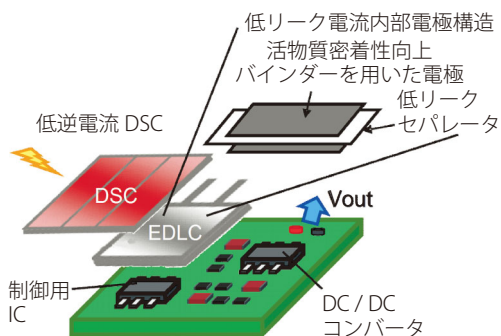


図7 開発目標の超小型高効率屋内用自立電源の模式図

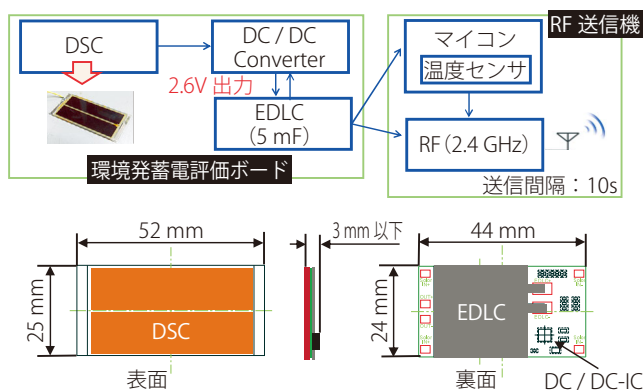


図8 試作した自立電源搭載無線センサネットワーク端末

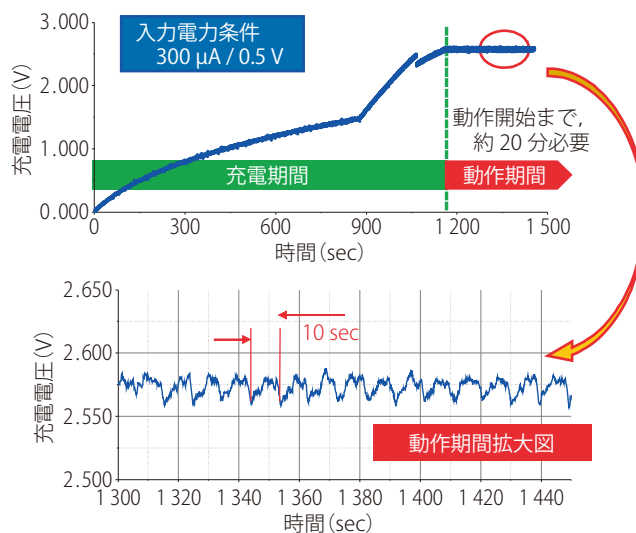


図9 試作した自立電源搭載無線センサネットワーク端末

実証) ボード) を開発している (図7)。

DSC と EDLC と DC / DC コンバータで試作した自立電源を搭載した無線センサネットワーク端末のブロック図を図8に示す。DSC は 1 セルであり、その有効面積は 8.6cm^2 である。EDLC は 5mF の低容量のもので、制御基板に両面実装している。この構成により屋内照明環境下

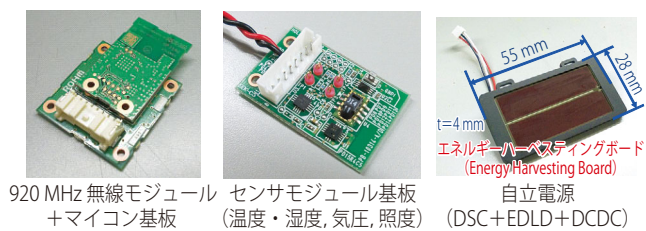


図 10 無線モジュール

で温度センサの情報を送信することが可能となる。

消費するエネルギーの観点から考えると以下のようになる。充電電圧は 2.6 V なので、蓄えられるエネルギー量は $Q = CV = 5 \times 10^{-3} (\text{F}) \times 2.6 (\text{V}) = 13 \text{ mC}$ である。マイコン / 温度センサ / RF を 1 回駆動させるのに必要な電荷量は約 100 μC (満充電の $\sim 1 / 130$) であるので安定した動作が可能である。本評価で使用した DSC セルは蛍光灯 450 ルクス環境下で約 150 μW を発電している。この場合、図 9 に示すように、初期の充電には 20 分程度の時間を要するが、150 μW の発電量でも温度センサのデータの無線通信 (10 秒ごとに 1 回) 動作が永続的に可能であることを確認した。なお、動作期間とは、温度センサの値を読み取り、無線にて PC へデータ送信する期間である。

今後は、図 10 に示すような既存の 920 MHz 無線モジュールとマイコン、およびセンサモジュール (温度・湿度、気圧、照度) を自立電源で駆動させる無線センサネットワーク端末の試作開発を進め、スマートオフィス実証への道筋を示した後に、本プロジェクトで開発される赤外線アレーセンサを搭載した上で、中小オフィスでのグリーン

センサネットワーク実証を進めていくものとする。

4. おわりに

屋内の微弱な光環境でも効率よく発電が可能な“低逆電流 DSC” および DSC からの微小電力を効率よく蓄電できる低リーク電流 EDLC を開発し、DC / DC コンバータを組み合わせた“屋内向け発電蓄電ボード”を開発し、“屋内用自立電源”を試作した。

上記自立電源試作機にて屋内環境下で温度センサデータの無線送信 (10 秒ごとに 1 回) の永続的動作が可能であることを確認した。

今後は、本プロジェクトの中のスマートオフィス WG において、ターゲットとなる中小オフィス環境に合わせて自立電源の効率を高めるとともに、エネルギーマネジメント LSI との組み合わせ最適化を検証する。さらに、本プロジェクトで開発される低消費電力赤外線アレーセンサや CO₂ センサなどのグリーンセンサを搭載した、自立電源駆動無線センサネットワーク端末の試作・評価も実施し、グリーンコンセントレータ (グリーンセンサで得られた環境データの収集・転送を行う通信ノード) へのセンシングデータを送信し、クラウド経由でスマートオフィスのアプリケーションの実用性に関する検証をスマートオフィス WG 内でともに実施していく予定である。

〈謝辞〉 本稿記載の成果の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の共同研究業務の結果得られたものである。



奥 良彰

おく・よしあき

1998 年ローム(株) 入社、ULSI 研究開発本部配属。2009 年研究開発本部融合デバイス研究開発センター長。2013 年より研究開発本部センサネットワーク要素研究開発チームリーダー。2011 年よりグリーンセンサ・ネットワークシステム技術開発プロジェクトに従事。