

E D L C を用いた低環境負荷型
独立電源システムの開発と
W S N システムへの応用

2020 年 1 月

福島 志斗

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	本論文の目的と構成	10
	参考文献	11
第 2 章	WSN を対象とした独立電源システムの開発	15
2.1	序言	15
2.2	EDLC の原理	17
2.3	木炭 EDLC の特性と評価	22
2.3.1	木炭 EDLC の特徴	22
2.3.2	木炭 EDLC の特性	25
2.3.3	木炭 EDLC 用の制御回路	29
2.4	WSN システムの構成	33
2.5	実験結果と検討	35
2.6	結言	37
	参考文献	38
第 3 章	木炭 EDLC を用いた独立電源システム	41
3.1	序言	41
3.2	屋外照明灯用電源システム	43
3.2.1	木炭 EDLC を用いた屋外照明灯の設計・製作	43
3.2.2	木炭 EDLC の充電および出力制御回路の設計・製作	45
3.2.3	実験結果と検討	50
3.2.4	2 年 4 ヶ月経過後の動作状況	51

3.3	オフグリッド Wi-Fi 連続稼働電源システム	52
3.3.1	木炭 EDLC の直列接続	52
3.3.2	200Wh クラス充電および放電制御回路の設計・製作	55
3.3.3	実験結果と検討	59
3.4	1 kWh 級蓄電装置	63
3.4.1	大容量木炭 EDLC の特性	63
3.4.2	大容量木炭 EDLC の充電および放電制御回路の設計・製作	65
3.4.3	実験結果と検討	70
3.5	木炭 EDLC の信頼性向上	73
3.5.1	EDLC の劣化要因	73
3.5.2	過電圧保護回路の設計・製作	75
3.5.3	過電圧保護回路の動作実験結果と検討	78
3.6	結言	89
参考文献		91
第 4 章 木炭 EDLC の WSN システムへの応用		93
4.1	序言	93
4.2	WSN システムの構成	94
4.3	超音波型水位センサの開発	95
4.4	開発したシステムの動作実験結果と検討	101
4.5	結言	106
参考文献		107
第 5 章 結論		109
謝辞		112
研究業績		114

第1章

序論

1.1 研究背景

近年、世界的には気候変動枠組条約締約国会議 (COP:Conference of the Parties on Climate Change) [1] や持続可能な開発目標 (SDGs) [2], 国内では Society 5.0 [3] などの環境対策を含む取り組み行われ, 低炭素社会を実現するため再生可能エネルギーを用いた発電量の増加と二酸化炭素 (CO₂) の削減などの低環境負荷型の電気エネルギーを供給するシステムが求められている.

低環境負荷型の電力供給システムとは, 発電過程における CO₂ 排出量だけでなく, エネルギー資源を輸送する際に必要となるエネルギーの発電および蓄電設備の設置や製造, 廃棄時における環境への負担や送電する際の電力損失を抑えるなど, 電気エネルギーを得る段階から消費するまでの過程において, 環境への負担を軽減したシステムであると考えられる.

図 1.1 に世界の電力供給量に占めるエネルギー源の割合を示す. 現在の電力を供給手法は, 大きな電力需要に対応するため, 大規模な発電が可能である火力発電, 原子力発電や水力発電が多くの割合を占めており, 大部分は化石燃料に依存した状態となっている [4].

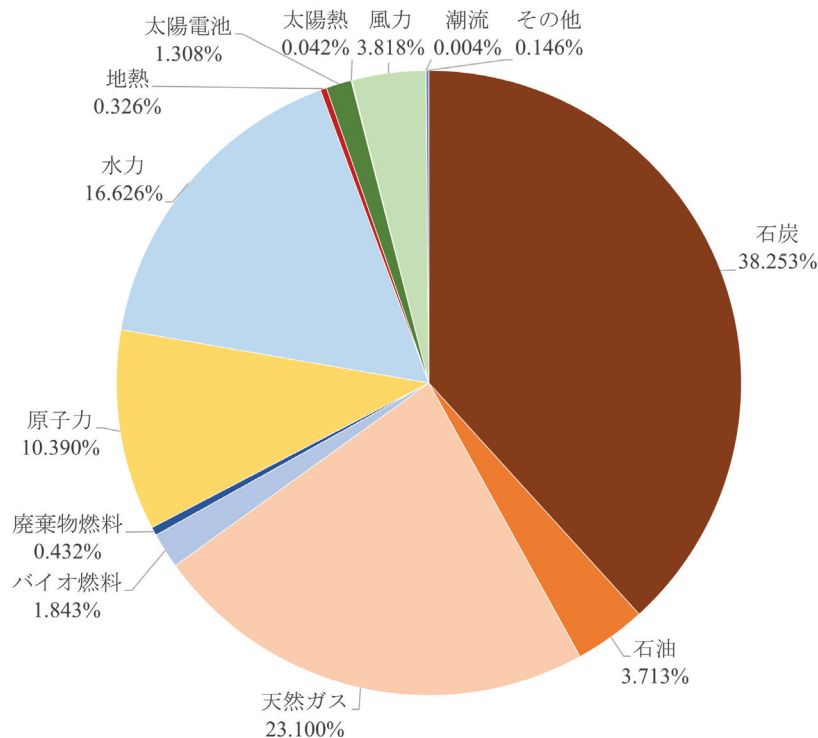


図 1.1 世界の電力供給量に占めるエネルギー源の割合 [4]

火力発電は、エネルギー資源として石油、石炭や天然ガスなどの化石燃料が用いられており、発電における燃焼時や資源の輸送時において CO_2 を多く排出する。さらに、化石燃料は地下に埋蔵している不可逆的なエネルギー資源であるため、大気中の CO_2 を増大させる大きな要因となり、同時に資源が枯渇するという問題も抱えている。

原子力発電は、核分裂による熱エネルギーを電気へ変換しているため、発電の過程では CO_2 を排出しないが、原料となるウラン鉱石の運搬や発電設備の建設において多くの CO_2 を排出する。さらに、核燃料は発電の有無を問わず放射能を有するため、使用済み燃料の保管だけでなく廃炉に伴う核汚染物質の管理が大きな課題となっている。

水力発電は、発電時に CO_2 を排出しないものの、水を一時的に蓄えるためにダムを建設する必要があり、建設する場所が限定され環境への負担も大きい。これらの発電方法は、発電時や建設時において環境への負担が大きいことやエネルギー資源の枯渇といった課題を抱えており、自然環境に対する影響を配慮した循環型のエネルギー供給システムの普及が世界的な課題となっている [5]。

これまでの発電が有する課題の対策として、風力発電、太陽光発電、地熱発電や海洋エネルギー発電など CO_2 の排出や環境負荷を抑えた再生可能エネルギーを用いる発電シス

テムの活用が世界的に進められている。再生可能エネルギーとは、電気エネルギーを得る際に自然界に存在するエネルギー源として永続的に利用できるものであり、風力、太陽光、地熱や海洋エネルギーなどが挙げられる。また、従来からの手法でもある水力発電においても、水の位置エネルギーを利用して発電するため、発電時において CO₂ の排出することなく、資源の枯渇もないため再生可能エネルギーに位置づけられる [6]。

風力発電は、風の力を風車により回転運動に変換し発電機に接続することで電力を得ている。エネルギーが枯渇することなく CO₂ を発生しない発電手法であるが、風車による騒音公害の発生や落雷による破損、鳥類の生態系に対する影響を有しており、風車を設置する場所が制約される。さらに、機械的な可動部を有するため、定期的なメンテナンスや強風時の故障を防ぐため定常的に動作の管理を必要とする [7]。

太陽光発電 (PV : PhotoVoltaic) は、半導体や有機系材料、色素等を用いて太陽光エネルギーにより発電する手法であり、エネルギー源が太陽であるため枯渇することなく、発電時には CO₂ を発生しない。また、発電に使用する太陽電池 (PV セル) は、可動部が無く軽量であるために他の発電方法と比較して設置場所に制約が無く、メンテナンスも容易であるため分散化形のエネルギーとして導入が進むことが予測される。しかし、課題として太陽エネルギーからの変換効率が 20% 程度と低いことや PV セルの効率的なリサイクル方法が確立されていないことが挙げられる [8,9]。

地熱発電は、地中にある高温の地下水をエネルギー源としており、エネルギーの枯渇や CO₂ の排出がなく、天候や日照に関係ない安定した発電を可能とする。しかし、自然公園や温泉が湧く地域に限定されるため自然環境や地域観光資源の保護、景観の問題があり実際に発電設備を設置することが可能な場所は多くない。さらに、設備を設置する際には、大規模な地盤の掘削を必要とするため、環境への負荷が大きい [10]。

海洋エネルギー発電は、波力発電、潮流・海流発電や海洋温度差発電など様々な手法によるエネルギー変換の技術が開発されており、潮汐力発電は数ヶ所で稼働している発電施設があるものの、その他の発電手法は研究段階にある。世界的には海洋エネルギーが有するポテンシャルは高いが、発電の構造に機械的な可動部を有するため、耐久性や定常的なメンテナンスの課題がある。また、環境面に関しては、発電施設の設置場所が海洋に面した沿岸部に限定され、発電した電力の送電に長距離の送電線を敷設する必要があることや、発電施設で大規模な開発工事を要するため負荷が大きい [11]。

また、動植物等の生物資源を燃焼やガス化することによりエネルギーを得るバイオマスがある。バイオマス発電は、植物等が大気中の CO₂ を光合成により吸収して生育した後、直接燃料として使用する場合と木材や食料として利用した後の廃棄物を燃料とする場合がある。発電時には、いずれの手法でも CO₂ を排出するが、長期的な観点では炭素が循環

しており、大気中の CO₂ が増加しないという考えから再生可能エネルギーに分類される。しかし、バイオマス発電の課題は、エネルギー源となる資源が小さな単位で広範囲に分布しているため、資源の収集や運搬においてエネルギーを必要とし、発電システムの規模が他の発電方法より小さくなる [12]。

図 1.2 に世界における再生可能エネルギーの設備導入量割合を示す。これらの再生可能エネルギーは、それぞれの特徴を活かしてエネルギーの活用が進められている [13]。

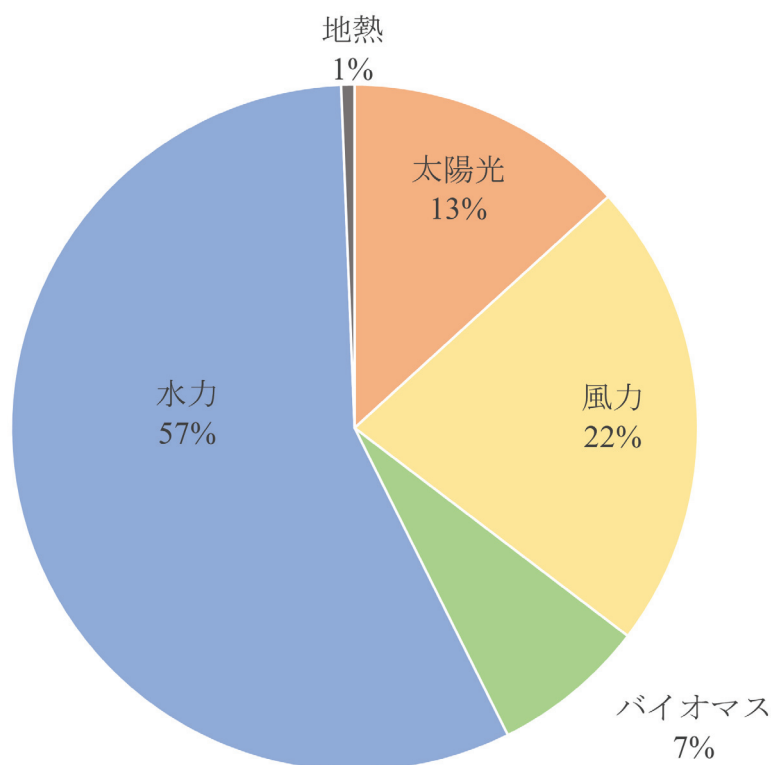


図 1.2 再生可能エネルギーの設備導入量割合 [13]

現状において、水力発電を除いた再生可能エネルギーの導入量は、設備の導入に必要な労力や発電量の大きさから、風力発電と太陽光発電が主力となっている。今後も再生可能エネルギーの活用は、風力発電と太陽光発電が増加されることが見込まれており、太陽光発電が有する特徴から導入が加速することが推測される [14]。

再生可能エネルギーによって発電された電力の多くは、有効利用するために既存の電力配線網に接続して送電される。しかし、発電量が気象条件によって変動する発電方法もあるため、揚水発電や火力発電の発電量調整によって、電力システムの安定化が図られている [15–18]。しかし、近年では再生可能エネルギーによる発電システムの急速な普及によ

り、揚水発電や火力発電を用いた電力系統の制御は困難になっている。そのため、系統の周波数及び電圧の不安定化が懸念されている。その対策として、電力貯蔵システム用いた電力供給の平準化に関する研究が盛んに行われている [19–21]。電力系統の安定化には大電力が貯蔵可能なシステムが求められている。具体的には、圧力エネルギーに変換して貯蔵する圧縮空気貯蔵 [22, 23] や回転エネルギーとして貯蔵するフライホイール [24, 25]、電磁気エネルギーとして貯蔵する超電導貯蔵 [26]、化学エネルギーとして貯蔵する NaS 電池やレドックスフロー電池などがある [27]。

また、比較的小規模な再生可能エネルギーには、化学反応を充放電に利用した小型の二次電池として鉛蓄電池、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池などが主に用いられている。

鉛蓄電池は、水溶液系の電解液であるため発火や爆発の危険性が少なく、安価に製造することが可能であるため、無停電電源装置や自動車、蓄電設備などに用いられている [28]。しかし、鉛蓄電池を構成する材料は、電極に鉛を使用しているため人体に対して有害であり、過放電の状態にすると陰極の表面に硫酸鉛の結晶が発生 (サルフェーション) し、直列抵抗が増加する。さらに、充放電を繰り返すと正極の二酸化鉛が徐々に崩れ、反応効率が低下するため充放電サイクルの寿命が短い。

ニッケル水素蓄電池は、内部抵抗が低く急速な充放電が可能であり、比較的に動作温度範囲も広く、過放電や過充電に対してもある程度の耐性を有している。また、電池を構成する材料は電解液に水酸化カリウムを使用し、電極材料も環境負荷の少ない材料を使用しているため安全性が高い。しかし、短所は、加熱時や深い過放電時に水素ガスを発生するため使用時の取り扱いに注意を要することや、メモリー効果により継ぎ足し充電をした際に電池容量が減少したように見える現象が起きることなどがあげられる。よって、充放電する際には、電池の温度管理や電池容量の管理を適切に行うための制御回路を必要となる。また、陰極に使用している水素吸蔵合金は数種類あるが、いずれも希少金属 (レアメタル) を用いており、資源の埋蔵量や採掘時の環境負荷についても懸念される [29]。

リチウムイオン蓄電池は起電力の電圧が他の二次電池と比較して高いため、高いエネルギー密度を有し、充放電の過程では電極に対してリチウムイオンの挿入離脱反応であるため充放電のサイクル特性が良い。また、メモリー効果がなく、自己放電による貯蔵された電力量の減少も少ない。しかし、高いエネルギー密度を有していること、や非水溶液系電解液による可燃性材料が電池内部に存在することや安全に使用できる電圧領域と危険になる電圧領域が近いことから、安全を確保するために充放電の制御回路や過電流保護を必要となる。また、電極に用いられるリチウムやコバルトなどの材料はレアメタルであり、材料の継続的な入手性も課題となっている [30]。

これら二次電池は、充放電の過程において電極と電解液間において化学的な反応が伴うため、電極の劣化、充放電効率の低下、充放電電流の制約や制御回路による電池の保護など様々な課題がある。一方、化学反応を伴わない蓄電デバイスとして電気二重層キャパシタ (EDLC : Electric Double Layer Capacitor) がある。EDLC は、電極表面において電解液中にあるイオンの吸脱着が充放電の過程であり、比較的蓄電容量が少ないものの、電極の化学反応を伴わないために急速充放電が可能であること、や電極の劣化が無いため充放電サイクルが長い特徴を有する。また、EDLC の材料は、電極の表面積を多くするため必要があるために活性炭が用いられ、集電極には重金属を含まない材料で構成されるため、環境への負荷が少ない [31]。現状では、道路鋸 [32] や瞬間停電対策用電源 [33]、乗用車のエネルギー回生 [34] 等に応用されており、メンテナンスが難しく耐久性が求められるシステムに活用されている。

再生可能エネルギーは、エネルギー源が分散しており、発電したエネルギーを電力系統へ接続するには、既存の送電経路が有する容量を超えた送電が難しいことや送電時のロスがある。このために山間部や離島などにおいて蓄電装置を活用して独立 (オフグリッド) した電源システム、すなわちオフグリッドシステムを構築することが有効となる。さらに、オフグリッドの電源システムは、災害や事故により電力系統に障害が発生した際でも影響を受けないため、非常用電源としても活用することができる [35]。

低電力で環境発電と蓄電装置を組み合わせた活用例として、IoT (IoT : Internet of Things) 技術を活用した、遠隔から状態をモニタリングするワイヤレスセンサネットワーク (WSN : Wireless Sensor Network) システムの導入が各分野において盛んに行われている [36–38]。

WSN システムは、応用先として水道やガスの料金メーターを遠隔管理するインフラ分野、環境モニタリングによる災害情報を収集する防災分野、ウェアラブルデバイスによるヘルスマニタ等の医療分野、気象情報や土壌成分情報を収集する農業分野など多岐にわたり、さらに発展して生活に密着したシステムとなることが推測できる。

WSN システムに利用される無線通信は、通信速度を抑えることで Wi-Fi などの通信と比較して長距離で低消費電力が実現されている [39]。電源供給が困難な場所に設置する WSN システムは、大規模な工事を必要としない環境発電と蓄電装置を組み合わせた電源装置が多く利用されている [40]。しかし、蓄電装置を用いる場合には蓄電するデバイスの寿命と構成される材料から、メンテナンス性と環境への安全性が課題となっているため、長寿命で環境に配慮した蓄電デバイスが必須となる。再生可能エネルギーを活用したりリモートセンシングの電源システムに用いられる蓄電装置は、設置する環境や得られるエネルギー量、負荷の電力消費量など複数の条件を考慮して選択され、WSN システムなどの

比較的に低電力なシステムでは、二次電池や EDLC がよく用いられる。

WSN システムと比較して、消費電力が大きく各地に数多く設置されている電気機器として屋外照明がある。照明機器は、青色 LED の発明により白色の LED が開発され、大幅な省電力化が実現されている [41]。この白色 LED による照明機器は、長寿命で消費電力が少ないことから白熱電球や水銀灯からの置き換えが進んでいる。さらに、LED は低電圧での点灯が可能であるため、自然エネルギーを利用したオフグリッドの屋外照明機器を比較的容易に構成することが可能となる。自然エネルギーの電力を用い、LED を利用した独立型屋外照明を動作させるためには、PV モジュールや風力発電等で得られる電力を一時的に蓄えて安定化させるため、蓄電池などの機器を併用しなければならない。一般的な独立型の照明機器は、蓄電デバイスとしては鉛蓄電池やリチウムイオン二次電池など利用した機器が製品化されている [42]。屋外に設置する電気機器は、屋内と比較して広い動作温度や耐久性、低い環境負荷などが要求され、化学反応を充放電に使用している二次電池ではすべてを満足することは難しい。また、照明が LED の利用により大幅に省電力化されたことで、エネルギー密度が低い EDLC を利用した蓄電装置の活用も考えられる。

照明機器は夜間のみ電力を消費するが、屋外で常時電力を消費する機器として観光地等に設置されている無料公衆無線 LAN がある。特に自然を観光資源とする場所では、電力の確保が難しいためにオフグリッドの電源システムによる電力供給が、環境保護の観点からも有効な手段であるといえる。オフグリッドシステムの電力システムは、PV モジュール等の自然エネルギーから得られる電力を用いることになるが、常時の利用を必要とする目的とする情報通信機器を 24 時間可動させるためには、発電装置と共に蓄電装置を併用しなければならない。また、オフグリッドの電源システムは、電力系統からの送電線を設置する必要が無く、災害等による停電時でも単独で動作が可能であるため、避難所等に設置する公共の情報通信機器に対する電源システムとして有用である [43]。屋外に機器を設置することの特性から、組み合わせる蓄電装置には広い動作温度範囲と高い耐久性、低い環境負荷などが求められる。これらの課題に対して、二次電池の技術開発により蓄電装置として組合せることも可能であるが、蓄電容量が大きい EDLC を適用することも可能である。

低炭素社会の実現に向けて、PV モジュールを設置する住宅が増えつつあり、パワーコンディショナーを介して電力系統に接続し、電力の売買をすることが珍しいことではなくなった。しかし、各住宅の発電量が電力系統と比較で僅かな発電量であっても、設置する住宅が増えてきたことで電力系統への影響が無視できない状況となっている [44]。

この課題の解消とエネルギーの地産地消、災害時における非常電源の役割をはたすことを目的として、一般家庭においても住宅に設置された PV モジュール等により発電され

たエネルギーを一時的に蓄える住宅用蓄システムが普及しつつある [45]. 一般的な住宅では、PV モジュールと数 kWh から数十 kWh の蓄電装置を組合せることで、昼間は太陽光で発電した電力を安定化して使用し、夜間は蓄電した電力によって消費される電力を賄うシステムが開発されている [46]. この住宅用蓄電システムには、主に鉛蓄電池やリチウムイオンといった二次電池が用いられることが多く、安全性の確保やの耐久年数、周囲温度の影響、環境負荷などの課題を有する [47, 48]. 一方、EDLC は繰り返しの充放電でも劣化が殆どなくサイクル特性が非常に良く、周囲温度による充放電の制約も少ないため、住宅用蓄電システムの蓄電装置として活用できるが、製造コストやエネルギー密度の観点から実用化には至っていない。

EDLC 内部の電解液として水溶液系と有機系があり、一般的な EDLC は有機系の電解液に用いる溶媒としてプロピレンカーボネート (PC) 等の有機系の材料が使用され、水分の混入による性能低下や可燃性液体であるため引火の恐れがある [49, 50]. 一方、水溶液系の電解液による EDLC は、若干の水分混入では大きな性能低下が無いいため、比較的容易に組み立てることができる。また、EDLC の電極は、その一部が活性炭で構成されており、石油を原料とする繊維から製造されるが、循環可能な資源である木材 (木炭) を用いた活性炭であっても EDLC (木炭 EDLC) の性能を十分に有することを確認している [51].

電力を蓄えるデバイスとしての EDLC は、エネルギー密度の低さから電力系統に接続するような大電力を対象とすると蓄電器の体積が膨大になるため適さない。しかし、WSN システムといった数 Wh から住宅用電力システムといった数 kWh 程度の蓄電容量が必要なシステムであれば、充放電効率やサイクル特性、安全性等の観点から有効な蓄電デバイスとして捉えることができる。

図 1.3 に提案する低環境負荷独立型電源システムのイメージを示す。発電手法は、発電時における CO₂ 排出を抑え、エネルギー源の枯渇が無く、設置場所が限定されにくい太陽光発電を用いる。蓄電デバイスは、主原料を循環可能な資源とし、長寿命であり、発火等の危険性が低く、汚染物質を含有せず、リサイクル可能な木炭 EDLC とする。また、PV と木炭 EDLC を組合せた電源システムには、用途に合わせた電力制御回路が不可欠であり、電源システムの規模に合わせて開発する。電源システムは、PV モジュール、木炭 EDLC と電力制御回路の組合せにより、環境への負荷が低く蓄電デバイスも含めた循環可能な独立電源システムとする。

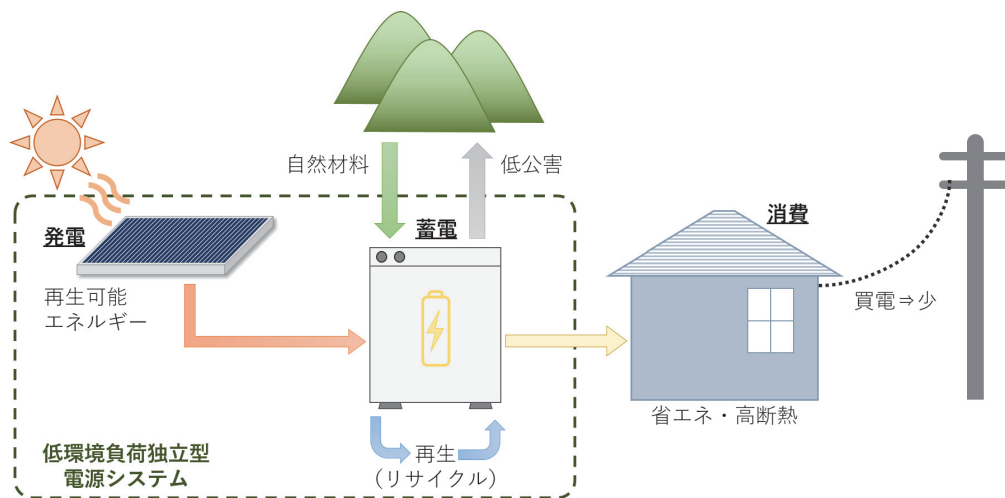


図 1.3 提案する低環境負荷型独立電源システムのイメージ

1.2 本論文の目的と構成

本論文では、発電部、蓄電部、充放電制御部および負荷部からなる低環境負荷型独立電源システムを開発し、その性能を実証実験によって評価することを目的とした。発電部では再生可能エネルギーである PV モジュールを、そして蓄電部では独自に開発した木炭 EDLC を用いた。蓄電部の木炭 EDLC は、バイオマス材料である木材を原料とする木炭を主原料とし、構成する材料に有害物質、重金属、や発火性の材料を含まず、低環境負荷かつ安全性の高い蓄電デバイスである。また、充放電制御部では専用の電気電子回路を設計・製作し、低環境負荷型独立電源システムを開発した。負荷部では WSN システム、照明装置などに応用して本システムの性能を実証実験によって評価した。

まず、第 2 章では一般的な EDLC と独自に開発した木炭 EDLC の構造と特性、木炭を原料とすることによる優位性を記述した。また、製作した木炭 EDLC の充放電特性について評価を行った方法を挙げ、蓄電器として利用できる可能性を示す。さらに、実際に蓄電装置として動作する際に必要となる制御回路の構成を提案する。開発した電源システムの応用として、近年の IoT 技術を活用した WSN を対象とした、木炭 EDLC と太陽電池による独立電源システムについて提案し、実証実験により有用性について示す。

第 3 章では、木炭 EDLC を用いた屋外用 LED 照明を試作し、長期間の実証実験を行った結果、照明を動作させるために必要となる電源システムの具体的な構成を記述した。また、オフグリッドで連続稼働する Wi-Fi システムに電源を供給するシステムの構成についても示す。また、照明装置より大容量の蓄電器を構成する際、木炭 EDLC の定格電圧による動作の違いについて、実証実験による検証結果についても述べる。

木炭 EDLC を用いて 1 kWh クラスの蓄電装置を構成した際、充放電に必要な制御回路を試作し、一般的な電気機器を動作させるシステムの構成について提案する。また、提案するシステムを試作し、実証実験による検証結果を示す。

第 4 章では、環境負荷が低い木炭 EDLC の特徴を活かすことのできる農業分野への応用を視野に入れ、水田にある取水口の遠隔管理システムを対象とした電源装置の開発と、取水口の水位を検出するセンサの試作に関して述べる。

最後に、第 5 章で本研究の結論を述べる。

参考文献

- [1] United Nations : “Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015”, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf> (2019/8/30).
- [2] United Nations : “The 2030 Agenda for Sustainable Development”, https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/pdf/about/_sdgs_summary.pdf (2019/8/30).
- [3] 内閣府：“第 5 期科学技術基本計画の概要”，<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf> (2019/8/30).
- [4] IEA(International Energy Agency)：“Key World Energy Statistics 2018”，<https://www.iea.org/statistics/?country=WORLD&year=2016&category=Electricity&indicator=ElecGenByFuel&mode=table&dataTable=ELECTRICITYANDHEAT>, (2019/9/8).
- [5] 道上 勉 著：“発電・変電(改訂版)”，電気学会(2000).
- [6] 財満 英一 編著：“電気学会大学講座 発電変電工学総論”，電気学会(2007).
- [7] 本庄 暢之，“風力発電システムの雷害状況”，電気学会誌，第 139 巻，第 8 号，pp.522-525(2019).
- [8] 石橋 幹弥, 芳賀 仁, 加藤 康司, 有松 健司，“太陽光発電システムの発電電力量向上のための小容量蓄電システムの充放電制御法”，電気学会論文誌D，第 139 巻，第 8 号，pp.743-750(2019).
- [9] 小林 広武，“太陽光発電大量導入時の電力系統への影響”，電気学会誌，第 137 巻，第 4 号，pp.212-215(2017).
- [10] 江原 幸雄，“地熱発電利用における最新の実情と持続可能な地熱発電技術”，電気学会誌，第 133 巻，第 7 号，pp.432-435(2013).
- [11] 大橋 弘隆, 前村 敏彦，“波力発電の最新動向”，電気学会誌，第 134 巻，第 6 号，

pp.338-341(2014).

- [12] 牧野 陽祐, 加藤 丈佳, 鈴置 保雄, “間伐残材を利用したバイオマス発電による CO₂ 排出削減の可能性”, 電気学会論文誌, 第 127 巻, 第 1 号, pp.201-207(2007).
- [13] 経済産業省 資源エネルギー庁: “平成 30 年度エネルギーに関する年次報告”, https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/whitepaper2019pdf_all.zip (2019/9/6)
- [14] 内山 洋司, “再生可能エネルギー発電技術のライフサイクル評価”, 電気学会誌, 第 126 巻, 第 4 号, pp.222-224(2006).
- [15] 村岡 克紀, ワグナー フリードリヒ, 山形 幸彦, 原田 達朗, “再生可能エネルギーの大量導入により予測される問題点”, 日本エネルギー学会誌, 第 98 巻, 第 1 号, pp.9-16(2019).
- [16] 諸住 哲, “NEDO「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」の概要”, 電気学会誌, 第 138 巻, 第 11 号, pp.732-733(2018).
- [17] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: “NEDO 再生可能エネルギー技術白書”, 森北出版株式会社, 第 9 章系統サポート技術 (2014).
- [18] 電気事業連合会, “電力の安定供給に向けた取組み”, 電気設備学会, 第 38 巻, 第 4 号, pp.213-216(2018).
- [19] 鶴谷 昂平, “分散型電源拡大下における欧米電力業界の新ビジネスモデル”, 電気設備学会, 第 38 巻, 第 4 号, pp.196-199(2018).
- [20] 田中 晃司, “電力貯蔵設備の最近の動向”, 電気設備学会誌, 第 39 巻, 第 4 号, pp.190-193(2019).
- [21] 杉浦 晃一, “低炭素社会に向けた次世代蓄電池研究”, 電気設備学会誌, 第 38 巻, 第 9 号, pp.538-541(2018).
- [22] 蓮池 宏, 日浦 俊哉, 伊藤 雅一, 光岡 正隆, 林 泰弘, “圧縮空気で電力を蓄電するシステム”, 電気設備学会誌, 第 39 巻, 第 4 号, pp.203-206(2019).
- [23] 矢嵩 健史, “空気熱利用のエコ技術ヒートポンプの未来を探る”, 電気学会誌, 第 138 巻, 第 10 号, pp.679-682(2018).
- [24] 長嶋 賢, “蓄電システムへの応用”, 電気学会誌, 第 138 巻, 第 7 号, pp.418-421(2018).
- [25] 山下 知久, 小方 正文, 長嶋 賢, “超電導磁気軸受を用いた超電導フライホイール蓄電”, 日本 AEM 学会誌, 第 24 巻, 第 4 号, pp.293-298(2016).
- [26] 新富 孝和, “日本における超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) の開発”, 電気設備学会誌, 第 35 巻, 第 4 号, pp.235-238(2015).
- [27] 辰巳 国昭, “蓄電池の概要と大型化に向けた開発動向”, 電気学会誌, 第 134 巻, 第

- 11号, pp.740-741(2014).
- [28] 広瀬 義和, 近藤 悟, “鉛蓄電池の技術動向”, 電気学会誌, 第134巻, 第11号, pp.758-761(2014).
- [29] 鎌浦 功典, 寺田 誠二, “ニッケル水素電池の技術動向”, 電気学会誌, 第134巻, 第11号, pp.742-745(2014).
- [30] 猿渡 秀郷, 阿左美 義明, 江草 俊, “リチウムイオン電池概要と応用事例”, 日本 AEM 学会誌, 第24巻, 第4号, pp.287-292(2016).
- [31] 坂井 良孝, “電気二重層キャパシタ式瞬低補償装置”, 電気学会誌, 第128巻, 第9号, pp.610-613(2008).
- [32] 辻プラスチック株式会社, センターライン 鋌, http://www.tsuji-pla.co.jp/wp-content/themes/tsuji/pdf/1_mcb-04os.pdf, (2019/9/9).
- [33] 株式会社 YAMABISHI, 瞬停対策電源 (瞬低対策電源), <http://www.yamabishi.co.jp/pdf/catalog/inv/syn-mmu.pdf>, (2019/9/9).
- [34] 高橋 正好, 橋 達朗, 北木 義正, 山下 丈晴, 北川 浩之, 平野 晴洋, “減速エネルギー回生システム” i-ELOOP” の開発”, マツダ技報 No.30, pp.37-42(2012).
- [35] 戸川 卓哉, Yi DOU, 大場 真, 根本 和宜, 中村 省吾, 藤井 実, “中山間地域における分散型エネルギーシステムのデザインと導入基準”, 土木学会論文集 G(環境), 第73巻, 第5号, pp.L107-L119(2017).
- [36] 戸辺 義人, “無線センサネットワークの技術動向”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J90-B No.8, pp.711-719(2007).
- [37] 前田 龍太郎, “自立型センサネットワークによる新たな社会の実現”, 電気学会誌, 第137巻, 第2号, pp.93-96(2017).
- [38] 鈴木 章夫, 藤本 淳, 伊藤 寿浩, 前田 龍太郎, “無線センサを用いた大規模電力可視化ネットワーク実証実験”, 計測自動制御学会論文集, 第52巻, 第12号, pp.698-706(2016).
- [39] Sakshi Popli, Rakesh Kumar Jha, Sanjeev Jain, “A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture”, Application and Challenges, IEEE Access, Vol.7, 18467954, pp.16739 -16776(2018).
- [40] 竹内 敬治, “エネルギーハーベスティングの最新動向”, 表面技術, 第67巻, 第7号, pp.334-338(2016).
- [41] Kanji BANDO, Kensho SAKANO, Yasunobu NOGUCHI, Yoshinori SHIMIZU, “Development of High-bright and Pure-white LED Lamps”, Journal of Light & Visual Environment, Vol.22 No.1, pp.1.2-1.5(1998).

- [42] パナソニック株式会社, ソーラー街路灯 (非常電源機能付), https://www2.panasonic.biz/lis/lighting/outdoor/street_light/solar/emergency_power/, (2019/12/05).
- [43] 安部 恵一, 天城 康晴, 山口 高男, “インフラ断絶時に強い災害時避難所管理システムの提案”, 情報処理学会 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム, 第 2016-UBI-52 巻, 第 11 号, pp.1-8(2016).
- [44] 駒見 慎太郎, “再生可能エネルギー大量連系による系統影響の全体像”, 電気設備学会誌, 第 35 巻, 第 11 号, pp.759-762(2015).
- [45] 経済産業省:「資料 2_更なる再エネ拡大を実現するためのエネルギー需給革新の推進～需給一体型モデルの活用～」, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/016_02_00.pdf, (2019/12/5).
- [46] 筒井 純治, “Z E H (ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス) の電気設備の動向について”, 電気設備学会誌, 第 36 巻, 第 8 号, pp.555-558(2016).
- [47] 加納 光益, 有田 裕, 柴田 康博, 内藤 憲樹, 落久保 隆, “ドイツにおける住宅用太陽光自家消費システムを実現するためのリチウムイオン電池システムの導入課題とその解決法”, 電気学会論文誌D, 第 138 巻, 第 5 号, pp.410-416(2018).
- [48] 坪田 正温, “最近の電池材料と加工技術－実用電池の最先端と課題 3. 鉛蓄電池”, 電気化学および工業物理化学, 第 59 巻, 第 9 号, pp.746-752(1991).
- [49] 森本 剛, “有機電解液を用いる電気二重層キャパシタ”, 炭素, 第 1999 巻, 第 189 号, pp.188-196(1999).
- [50] 江頭 港, 森田 昌行, “電気化学キャパシタの最新動向”, 電気学会誌, 第 126 巻, 第 2 号, pp.80-83(2006).
- [51] 福間 眞澄, 内田 孝幸, 福島 志斗, 小川 仁一, 吉野 勝美, “木綿活性炭と水系電解液を用いた電気二重層キャパシタ”, 電気学会論文誌A, 第 134 巻, 第 5 号, pp.299-306(2014).

第2章

WSN を対象とした 独立電源システムの開発

2.1 序言

近年、省電力技術と無線通信技術の発展により、無線通信を用いた遠隔からモニタリングを可能とする WSN システムの導入が容易になっている。この WSN システムを電源供給が難しい場所において稼動するため、大規模な工事を必要としない環境発電 (Energy Harvesting) を利用した電源装置が活用されている。しかし、環境発電を利用する場合、主に自然から得られるエネルギーにより発電するため、得られる電力が不安定となり、システムに対して電力供給の安定供給するための蓄電装置が必要となる。屋外において蓄電装置を用いる場合、蓄電するデバイスの寿命と使用されている材料から、メンテナンス性と環境に対する安全性が課題となっている [1]。

現在、独立して動作する WSN システムには、一次電池もしくは二次電池、EDLC を環境発電と組み合わせたシステムの運用がなされている [2, 3]。しかし、一次電池は充電ができないため動作時間が限られ、二次電池は寿命、環境負荷、動作環境や安全性等の問題がある。また、一般的な EDLC は蓄電容量の小さなデバイスしかないことや、水分の浸入に弱い、引火性電解液による安全性などの課題を有している。

木炭を主原料とした活性炭を使用して、アルカリ水溶液を電解液とした電気二重層キャパシタ (木炭 EDLC) を独自で開発している。この木炭 EDLC は、二次電池と比較してエネルギー密度は低いものの、サイクル寿命が長いという特徴を有しており、遠隔地においてメンテナンスの回数を少なくすることができる。また、製造および廃棄時の環境負荷が少ないため、環境への配慮した安心・安全な電源システムを構成することができる [4, 5]。

本章では、PV モジュールとサイクル寿命の長い独自の木炭 EDLC を蓄電器として使用し、ZigBee 規格のモジュールをルータ機能として動作させた WSN システムを対象とし、電源装置として有効であるか実証実験を行った結果を記述する。

2.2 EDLC の原理

図 2.1 に一般的なキャパシタ (以下, 区別のためコンデンサとする) の構造を示す. コンデンサは, 電極を対向した状態に配置し, 電極間に電圧を印加した場合に両電極に電荷が蓄積される. コンデンサが有する静電容量 C は, 式 (2.1) で表される.

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (2.1)$$

ここで, S は電極の面積, d は電極間の距離, ε_0 は真空中の誘電率である. また, 電極間に誘電体として絶縁材料を挿入すると, 電極に誘電される電荷の面密度が ε_r 倍に増加し, 静電容量が増加する. ε_r は比誘電率と呼ばれ, ε_r の値は材料により異なる [6].

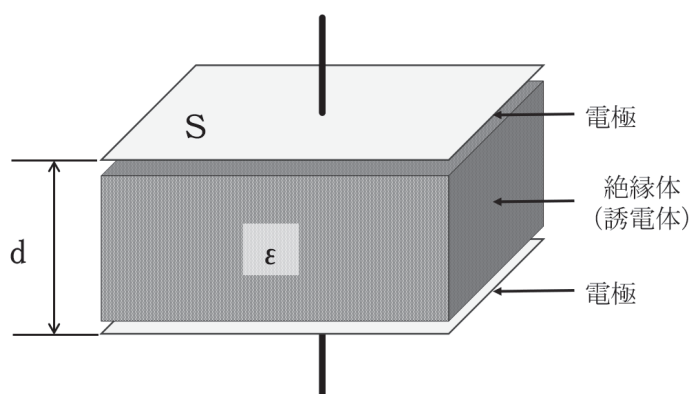


図 2.1 一般的なコンデンサの構造

図 2.2 に EDLC の構造を示す. 一般的に EDLC の構造は, 対向した電極間に 2 対の分極性電極と, 分極性電極同士が接触しないようセパレータからなる. それらすべてを電解液で満たした状態となっている.

EDLC の充放電現象は, コンデンサとは異なり電極界面において電解液中に存在するイオンの吸脱着により行われ, 電極の劣化がほぼ無く急速での充放電が可能となる. EDLC の静電容量は, 電極界面とイオンの距離が電解液中のイオン分子 1 個程度 (0.7~1.0 nm 程度) となり, 分極性電極として使用する活性炭の表面には細かな細孔を無数に有しており表面積が広いため, 一般的なコンデンサと比較して非常に大きな値となる.

EDLC が蓄電できる電力容量 P は, 静電容量 C と定格電圧 V_C を用いて式 (2.2) から求められる. 定格電圧 V_C 耐電圧を上げることで電力容量 P を大きくすることが可能となる.

$$P = \frac{1}{3600} \cdot \frac{1}{2} CV_c^2 \quad (2.2)$$

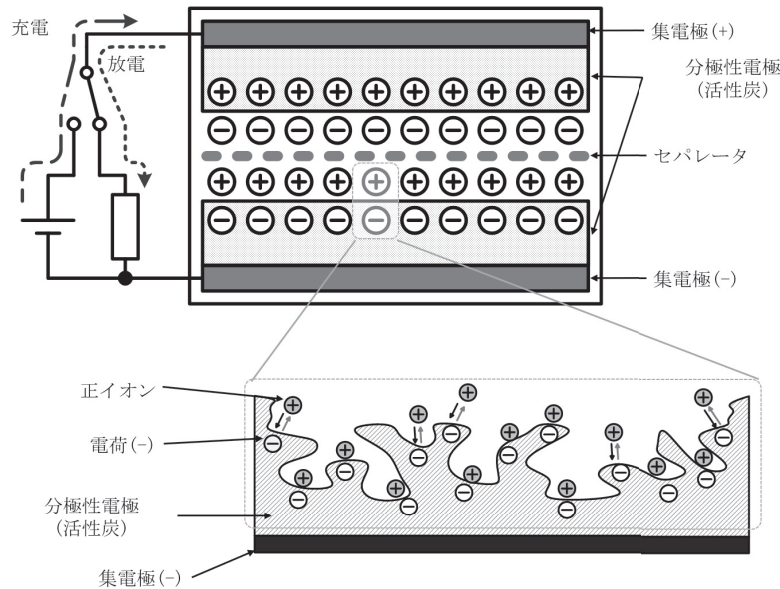


図 2.2 EDLC の構造

EDLC の定格電圧は電解液の電気分解電圧によって決定され、高い絶縁性能を有する誘電材料を用いるコンデンサと比較して低い値となる。EDLC に用いられる電解液は水溶液系と有機系に分類され、一般的には絶縁耐圧が高い有機系の電解液が使用されている。

有機系の電解液には、プロピレンカーボネート系やアセトニトリル系などが溶媒として用いられており、それらの電解液が電気分解する電圧は 2.5 V～3 V 程度となる。一方、水溶液系の電解液を使用した場合には水の電気分解電圧は 1.23 V となる [7]。

EDLC が劣化する原因として、電解液が外部に漏れ出すドライアップとキャパシ内部への水分侵入がある。特に水分の侵入は有機系の電解液にとって特性に大きく影響し、製造工程における湿度管理に難しさや、温度や湿度の変化が大きい屋外での使用において課題となる。

現在、電気エネルギーを繰り返し充放電可能なデバイスとして、様々な種類の二次電池が開発されており、それぞれの特徴を活かして電気製品の電源として実用化されている。WSN システムや IoT デバイスに使用されている二次電池の主なものは、鉛蓄電池、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池がある [8]。

鉛蓄電池は二次電池として最初に開発され、正極に二酸化鉛、陰極に鉛を電極として、

電解液として希硫酸が用いられ、充放電時の反応は次の式で表される。ここで、左辺から右辺への矢印の反応を放電時とし、逆を充電時とする。

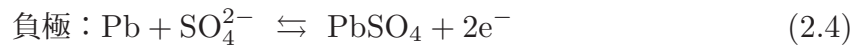
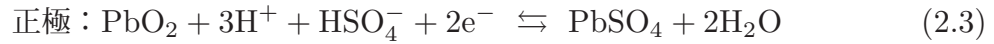


図 2.3 に鉛蓄電池の構造を示す。鉛蓄電池の特徴は、電解液として使用している希硫酸の電気抵抗が他の二次電池と比較して低いため高い出力密度を得ることができることや水溶液系の電解液であるため発火や爆発の危険性が少ないことなどである。また、電極に使用している鉛は人体に対して有害であるが、リサイクル体制が整備されていることや鉛の埋蔵量が豊富であり比較的単純な製造設備で生産可能であるため、安価に製造することができる。

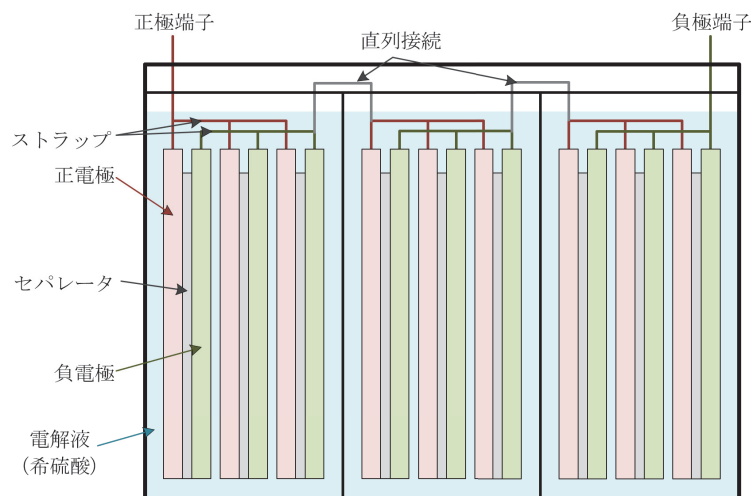


図 2.3 鉛蓄電池の構造

しかし、使用時の温度や負荷によって放電容量が大きく左右され、ニッケル水素電池やリチウムイオン電池と比較すると、エネルギー密度が低い。また、過放電の状態にすると陰極である鉛の表面に硫酸鉛（絶縁体）の結晶が発生し、陰極と電解液が接触する表面積が減少するため、直列抵抗が増加する。さらに、充放電を繰り返すと正極の二酸化鉛が徐々に崩れ、反応効率が低下する。

ニッケル水素蓄電池は、正極と陰極に水酸化ニッケルと水素吸蔵合金、電解液として水酸化カリウム水溶液が用いられ、充放電時の反応は次の式で表される。ここで、左辺から右辺への矢印の反応を放電時とし、逆を充電時とする。

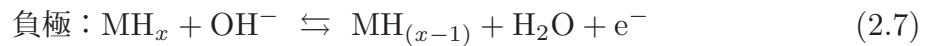


図 2.4 にニッケル水素電池の構造を示す。ニッケル水素電池の特徴は、①内部抵抗が低く急速な充放電が可能であること、②鉛蓄電池と比較して動作温度範囲が広いこと、③過放電や過充電に対してもある程度の耐性を有していることや環境負荷の少ない材料を使用しているため安全性が高いことなどがある。また、エネルギー密度はリチウムイオン電池に次いで高い値を示す。

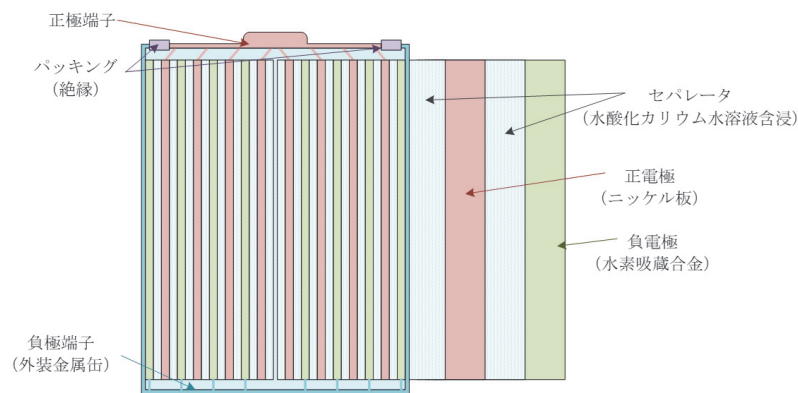


図 2.4 ニッケル水素電池の構造

しかし、加熱時や深い過放電時に水素ガスを発生するため注意を要することや、メモリー効果により継ぎ足し充電をした際に電池容量が減少したように見える現象が起きる。したがって、充放電する際には電池の温度管理や電池容量の管理を適切に行う制御回路を必要とする。また、陰極に使用している水素吸蔵合金は数種類あるが、いずれも希少金属（レアメタル）を用いており、資源の埋蔵量についても懸念される。

リチウムイオン蓄電池では、電極に使用されている材料の組合せは複数あり、それぞれに反応は異なるが、代表的な正極と陰極である炭素とコバルト酸リチウムを用いた際の反

応式を示す．ここで，左辺から右辺への矢印の反応を放電時とし，逆を充電時とする．

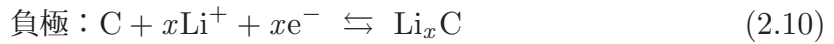
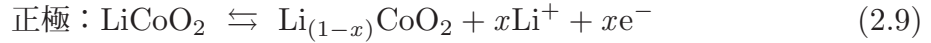


図 2.5 にリチウムイオン電池の構造を示す．リチウムイオン電池の特徴は，①動作電圧が他の二次電池と比較して高いこと，②高いエネルギー密度を有し，充放電の過程で酸化や還元といった化学反応が無いこと，③反応生成物がほとんど発生しないためサイクル特性が良いことである．また，メモリー効果が無いため，継ぎ足し充電による電池容量の減少が起きず，自己放電による貯蔵された電力量の減少も少ない．

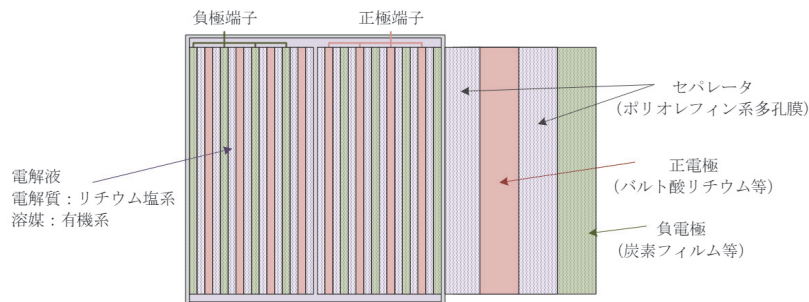


図 2.5 リチウムイオン電池の構造

しかし，高いエネルギー密度を持つために非水溶液系電解液による可燃性材料が電池内部に存在することや安全領域と危険領域が近いことになる．安全を確保するためには，充放電の制御回路や過電流保護を必要とする．また，電極に用いられるリチウムやコバルトなどの材料はレアメタルであり，材料の継続的な入手も課題となっている．

これらの二次電池は，それぞれの特性を活かし，使用するシステムの動作環境や特性に合わせて選択をする必要がある．また，電極の内部まで蓄電に寄与しているため，EDLCとくらべてより高いエネルギー密度を有する．

2.3 木炭 EDLC の特性と評価

2.3.1 木炭 EDLC の特徴

以前より開発を行っている木炭を原料とする木炭 EDLC は、市販の木炭を細かく砕き、粒子状となった木炭にアルカリ賦活処理を施した活性炭を使用し、分極性電極を作製している。

木炭 EDLC の分極性電極に使用する活性炭を製造する工程は、以下の通りである。木炭を 1 mm 以下の粒子状となるよう粉碎し、水酸化カリウム (KOH) 水溶液を含侵させる。その後、木炭の燃焼を防ぐため、窒素 (N_2) 雰囲気中において一定時間加熱することで賦活処理を行う。この時の加熱温度や時間については、木炭 EDLC の静電容量が最大となる条件を用いて賦活を行うことで活性炭を製造した。

図 2.6 に製作した木炭を材料とする活性炭の分極性電極、図 2.7 に木炭 EDLC の構造を示す。分極性電極は、賦活工程を終えた活性炭に電解液を加えて混練した後、プレス成型 (サイズ: 180 mm × 260 mm × 10 mm) することで製作した。電解液には、34 wt% の KOH 水溶液を使用した。作製した分極性電極を使用し、その片面に集電極 (0.3 mm) の金属板を配置し、セパレータ (ニッポン高度紙製, VL100, 厚さ 0.1 mm) により包み込むことで電極を作製した。

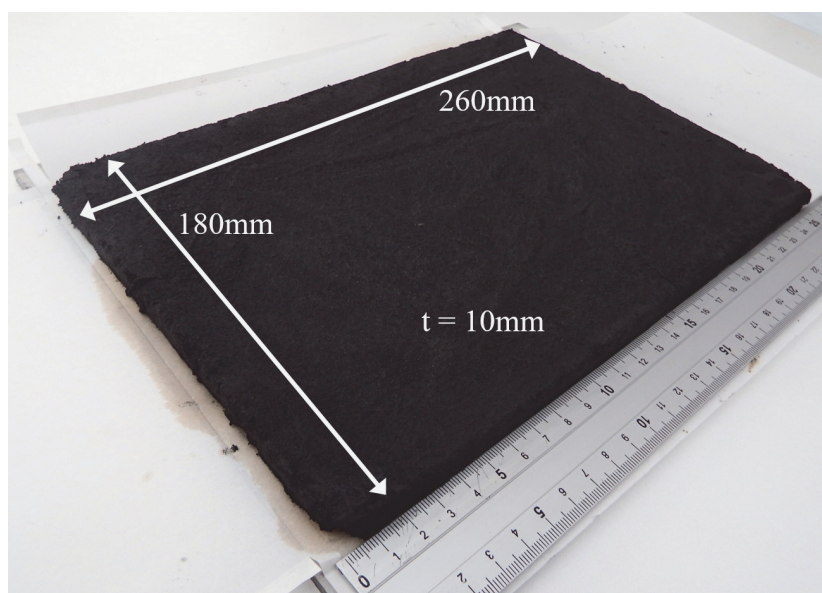


図 2.6 木炭を材料とする活性炭の分極性電極

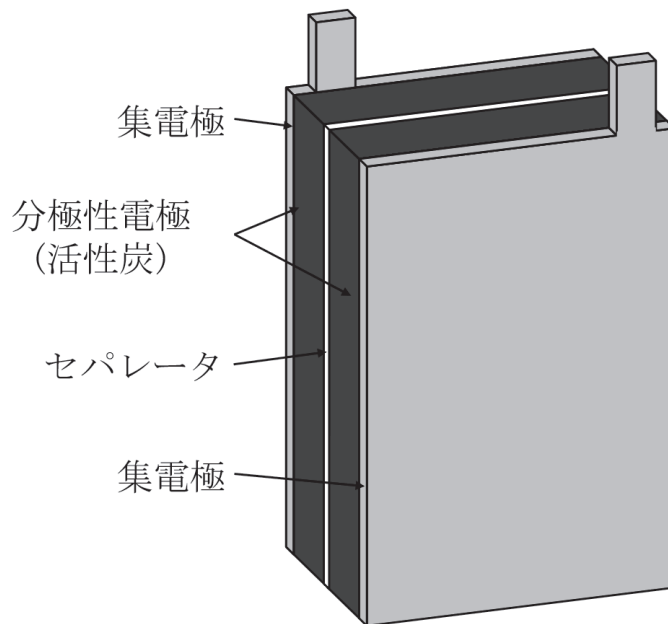


図 2.7 木炭 EDLC の構造

図 2.8 に木炭 EDLC1 セルを示す. 木炭 EDLC の 1 セルは, 作製した電極を対向して配置し, ガスバリア (アズワン製, 厚さ $70 \mu\text{m}$) に封入して作製した. 端子部は, 集電極の一部をガスバリアから露出させ, 露出部を封止することで外部へ取り出した.



図 2.8 木炭 EDLC の集電極と分極性電極

作製した 1 セルの木炭 EDLC は, 前述のとおり電解液に水溶液を使用しており, 水の電気分解電圧が 1.23 V であるため, 定格電圧を 1.0 V とした. 木炭 EDLC は, キャパシ

タであり電力の放出と共に端子電圧が低下し、1セルでは電子回路の動作が困難であるため、6セルを直列に接続したものを1ユニットとした。

図 2.9 に木炭 EDLC ユニットを示す。木炭 EDLC の1ユニットは、木製の箱 (外寸法：210 mm × 330 mm × 150 mm) を作製して梱包した。

木炭 EDLC は、屋外での使用に適した構造となっている。なぜなら、電解液に KOH 水溶液を使用しているため、水分浸入しても性能への影響が低い。また、電解液である KOH 水溶液は重金属を含まず、不燃性の液体であるため環境負荷が少なく、安全性が高い。

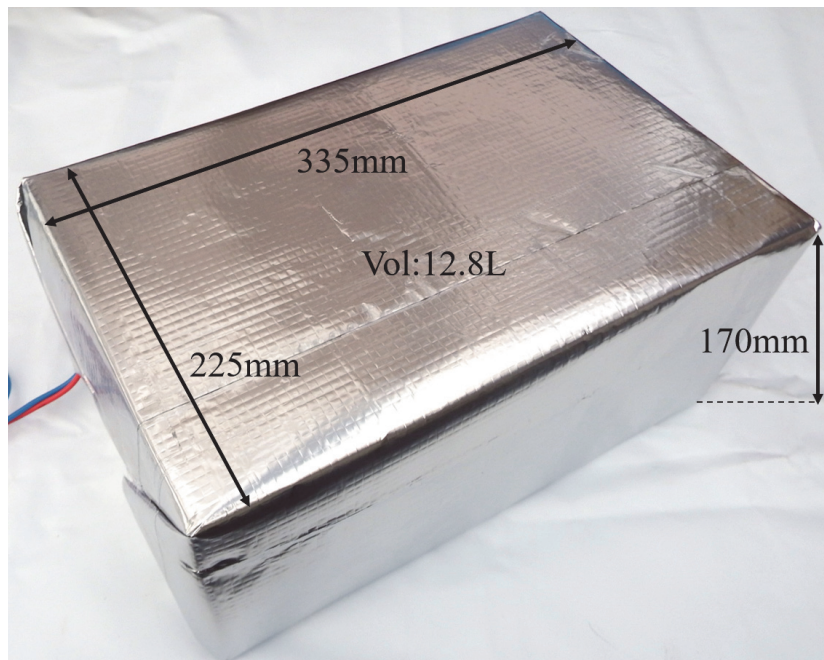


図 2.9 木炭 EDLC ユニット (定格電圧 6.0 V)

2.3.2 木炭 EDLC の特性

図 2.10 に分極性電極内の模式図，図 2.11 に EDLC の等価回路を示す．EDLC は，分極性電極内に複数のキャパシタと，活性炭の粒子同士の接続による抵抗が存在しており，キャパシタと抵抗を連続的に接続した回路で表すことができる [9]．

図 2.12 に EDLC の充放電時における端子電圧の変化を示す [10]．この EDLC を定電流により充放電した際，端子間の電圧変化は直線的な変化でなく，充電開始時と放電開始時において，端子電圧に抵抗での電圧降下成分が表れる．

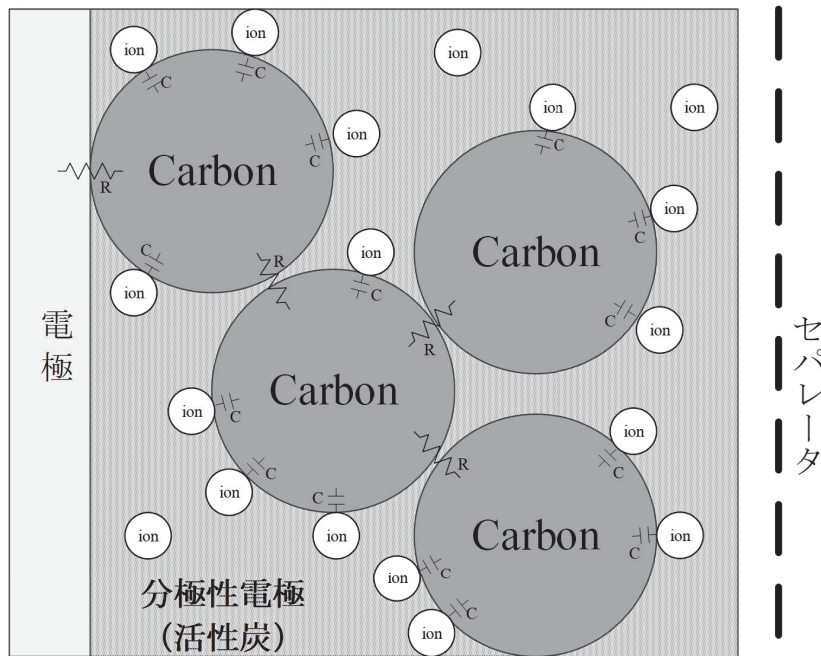


図 2.10 分極性電極内における蓄電の模式図

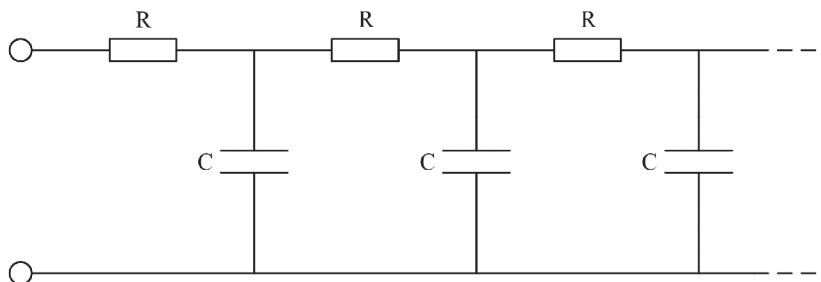


図 2.11 EDLC の等価回路

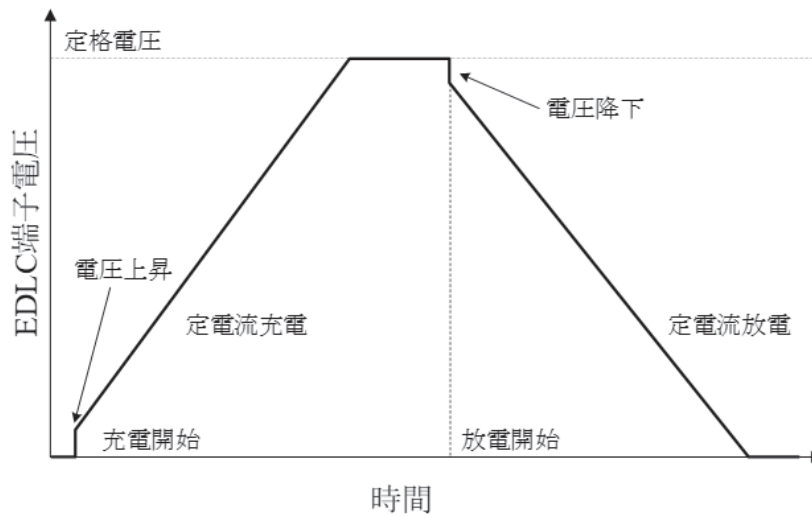


図 2.12 EDLC の充放電時における端子電圧の変化

EDLC が有する静電容量や蓄電容量の測定には、電圧微分法、電荷法やエネルギー換算法などの手法が提案されている [11].

図 2.13 に EDLC の電荷法による測定例を示す。電荷法は、充電した EDLC に定電流負荷を接続し、放電時における端子電圧の変化から静電容量を推定する方法である。十分に充電した EDLC に定電流負荷を接続し、EDLC 両端の電圧が時間的な変化を示し、その傾きと負荷となる電流値 I から静電容量 C を式 (2.12) により算出することができる。また、蓄電容量の算出は前述の式 (2.2) から算出することができる。木炭 EDLC が有する蓄電容量 P_C は、次式によって電荷法により測定した静電容量 C と定格電圧 V_R から算出された。

$$C = \frac{\Delta T}{\Delta V} \cdot I \quad (2.12)$$

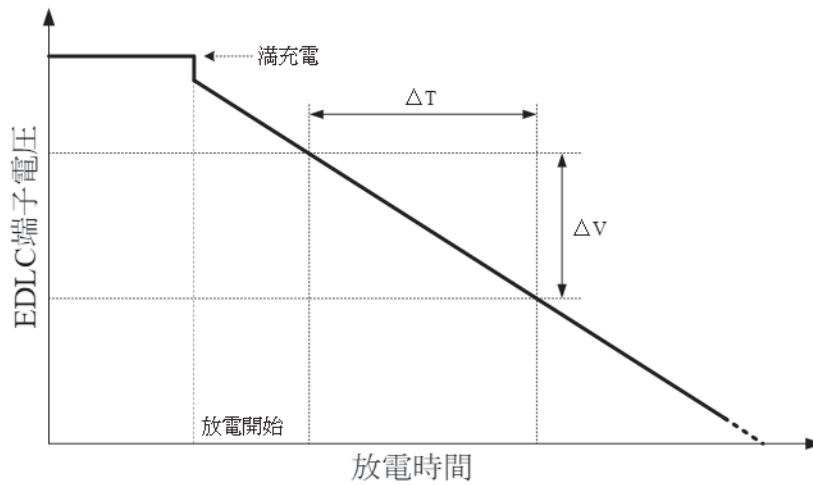


図 2.13 EDLC の電荷法による測定例

図 2.14 に木炭 EDCL の蓄電容量測定時の回路構成を示す．蓄電容量 P_C は，直流安定化電源（高砂製作所，KX-100L）と電子負荷（ティアンドシーテクニカル，3710A）を用いて計測された．1 ユニットの木炭 EDLC を充放電することにより，端子電圧の変化は計測された．端子電圧の測定には，データロガー（GRAPHTEC，GL-820A）を使用した．充放電時における接続の切り替えは，マイコン（Microchip，PIC12F1822）をタイマー動作させ，電磁リレー（OMRON，G2R-1）の接点を切り替えることにより行われた．

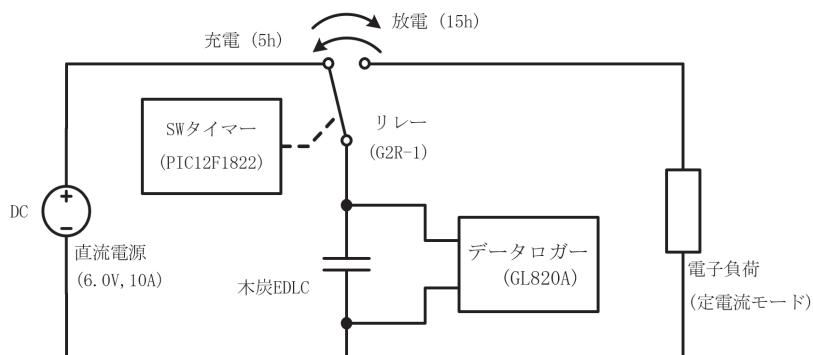


図 2.14 木炭 EDCL の蓄電容量測定時の回路構成

充放電して実験する際，木炭 EDLC の充電は，直流安定化電源を用いて木炭 EDLC ユニットの定格電圧である 6.0 V まで CVCC 制御 (6.0 V, 10 A) に設定して 5 h 充電した．放電時は，電子負荷を定電流負荷モード (1.0 A) に設定して 15 h 放電させた．

図 2.15 に木炭 EDCL の蓄電容量測定結果を示す．木炭 EDLC を前述の手法により放

電させた際の放電時間が 18,000 s となる。電圧変化が直線に近い 2 点を計測して蓄電容量 P_C の値は求めた。測定の結果、電位差 V_{drop} が 3.816 V、負荷電流 I_L を 1.00 A としたため、蓄電容量 P_C は 23.6 Wh であった。

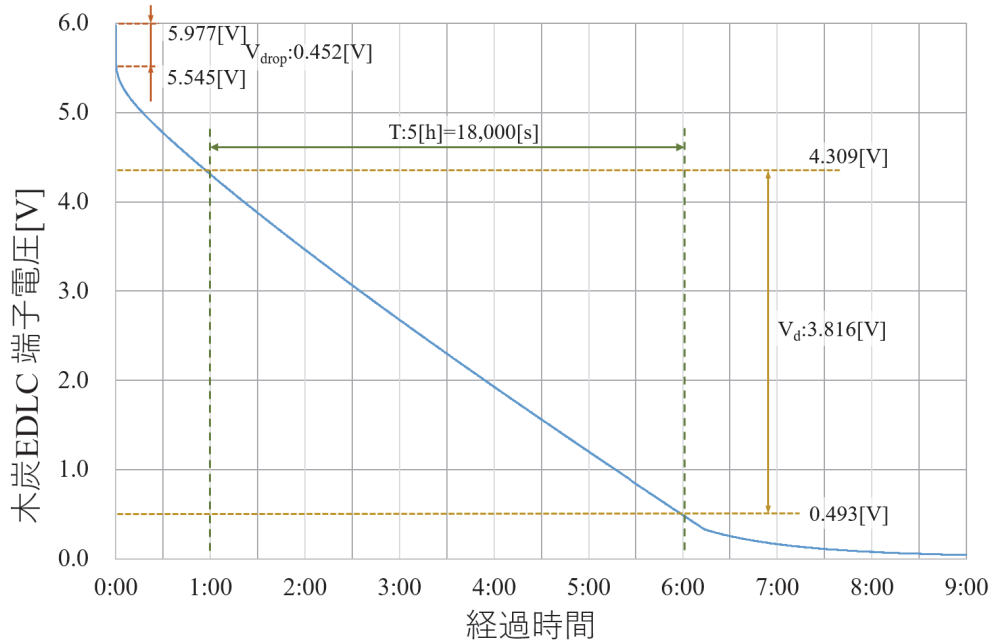


図 2.15 木炭 EDCL の蓄電容量測定結果

EDLC が有する直流内部抵抗 r_0 は、電流が流れた際の電圧降下から推定される。一般的に充電終了点直流内部抵抗測定法と放電開始点直流内部抵抗測定法が用いられるが、本研究では後者の手法により EDLC の直流内部抵抗 r_0 は測定された。

負荷電流を 1.00 A で放電を開始した直後、端子電圧が 0.425 V 低下したので、式 (2.13) より r_0 を 452 mΩ と推定した。

$$r_0 = \frac{V_{drop}}{I} \quad (2.13)$$

2.3.3 木炭 EDLC 用の制御回路

EDLC を蓄電装置として使用する際、二次電池とは異なる特性を有するため、電力を素早く蓄電する充電制御回路と、電力を安定的に取り出す出力制御回路が必須となる [12].

図 2.16 に二次電池と EDLC の充電時における端子電圧変化を示す. EDLC を充電する際、EDLC に蓄えられる電力量は式 (2.2) で表され、EDLC が完全に放電している際には端子電圧が 0 V となる. よって、完全放電した EDLC の初期充電には、充電制御回路の出力端子から見た負荷となる EDLC は短絡に近い状態となる. 一般的に二次電池を充電する際、過電流により二次電池が損傷することを防ぐことを目的として、充電電流の制限を設けている. 一方、物理現象を利用して蓄電する EDLC は、急速充電を許容する特性を有するため、急速充電にはより大きな電流で充電することが望ましく、充電初期において可能な限り大きな充電電流を確保できる充電制御回路の設計が必要となる [13].

図 2.17 に一般的な非絶縁型降圧 DC/DC コンバータの回路図を示す. 実際には、エネルギーを供給する電源と蓄電器のシステムのバランスを考慮し、最大充電電流を設定して制御回路を設計する [14].

EDLC の充電制御回路は、充電初期において入力電圧と出力電圧の差が大きく、EDLC に対して十分に電流供給可能なインダクタンス、スイッチングデバイス、スイッチング周波数を設定する必要がある [12]. また、大きな電流を扱う際、インダクタによりサージ電圧が発生するため、スイッチングデバイスを保護する付加回路が必要となる. さらに、蓄電デバイスに対しての電力供給は、出力側から電流が逆流することを阻止する必要がある. 逆流防止には、ダイオードによる手法があるが、電流が大きい場合にはダイオードでの損失が大きくなるため、FET 等のスイッチングデバイスを用いた制御の方が効率的に動作する.

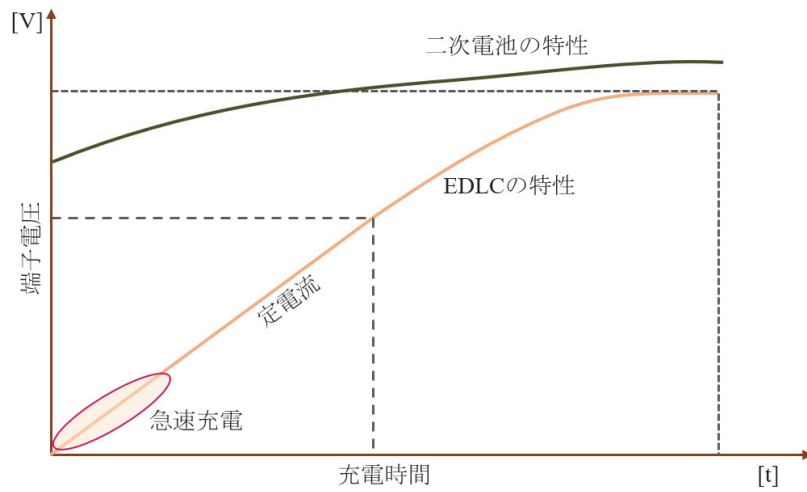


図 2.16 二次電池と EDLC の充電時における端子電圧変化

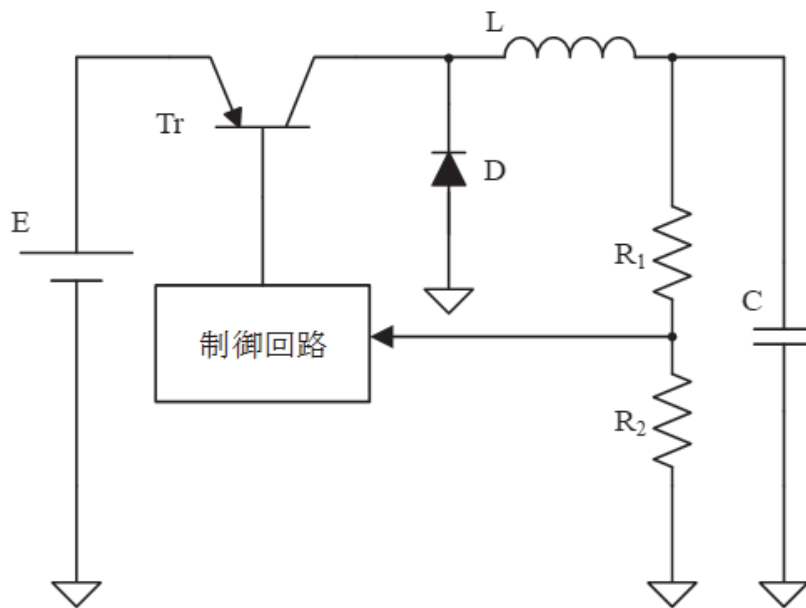


図 2.17 非絶縁型降圧 DC/DC コンバータ

図 2.18 に二次電池と EDLC の放電時における端子電圧変化を示す。蓄電デバイスから電力を取り出す際、二次電池であれば化学反応により蓄電しているため、端子電圧はある程度の範囲で安定しているが、EDLC の場合は電力残量に応じての端子電圧は低下する。電子回路の動作には、安定した電力の供給が必要となるため、EDLC の端子電圧に関わらず出力電圧を安定化する制御回路が必要となる。

図 2.19 に一般的な非絶縁型昇圧 DC/DC コンバータの回路図を示す。EDLC に蓄えられた電力をより多く取り出すには、EDLC の端子電圧が低い状態でも動作する出力制御回路の設計が必要となる。この制御回路を設計する際、EDLC は定電力の負荷を接続された状態となり、端子電圧の低下と共に出力する電流量が増加するため、制御回路に用いるデバイスが有する定格値を広い範囲を想定して選定することも必要となる。

出力制御回路のインダクタは、入力電圧が低下した際に十分な電流が流れるインダクタンスをスイッチング周波数と入力電圧から設定する必要がある。出力電圧を安定化するコンデンサは、入力電圧と出力電圧の差が大きい場合に出力電圧に重畳した脈動成分 (リップル) が大きくなるため、大きい静電容量を選定する必要がある。しかし、静電容量を必要以上に大きくすると出力が安定するまでに時間を要する。スイッチング時に逆流を阻止するダイオードは、出力に接続するコンデンサが大きくなると電源投入時に大きな突入電流が流れるため、十分な電流容量を確保する必要がある。スイッチングの制御は、スイッチングデバイスの破損を防ぐため、電流制限の機能を必要とする。

また、出力制御回路は、動作開始時に出力電圧の安定後に負荷への接続、入力電圧低下時に動作停止、入力電圧の電圧降下を考慮した動作の制御を必要とする。

このときに、EDLC に蓄電されたエネルギーの利用率は式 (2.14) となるため、できる限り低い電圧まで昇圧が可能な電源回路を接続する必要がある。EDLC に昇圧型 DC/DC コンバータを接続することで、EDLC に蓄電した電力の多くを利用することができる。ここで、 η_p を電力利用率、 V_m を EDLC の定格電圧、 V_L を出力回路入力下限電圧とする。

$$\eta_p = \frac{V_m^2 - V_L^2}{V_m^2} \cdot 100 \quad (2.14)$$

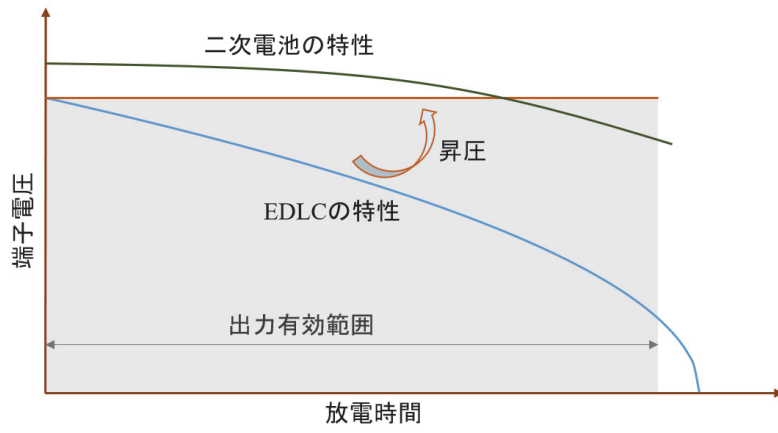


図 2.18 二次電池と EDLC の放電時における端子電圧変化

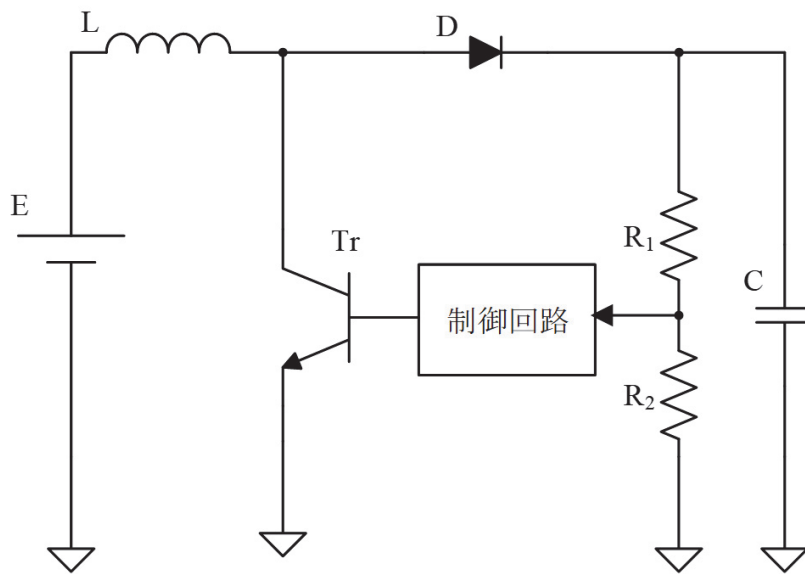


図 2.19 非絶縁型昇圧 DC/DC コンバータ

2.4 WSN システムの構成

図 2.20 に WSN システムのルータとセンサノードを兼ねたシステムを想定したブロック図を示す。ワイヤレスモジュールには、ZigBee 規格に準じた通信モジュール (Digi International Inc., XBP24-AUI-001J) を使用した。ZigBee 規格では、P2P, スター型, メッシュ型のネットワークトポロジーを構築できる。ZigBee 規格を使用したネットワークは、コーディネータ, ルータやエンドデバイスの 3 種類のノードが構成できる [15]。

この中でエンドデバイスは低消費電力を実現できるノードであり, 小型の一次電池を使用して数年の動作が可能となっている。しかし, 通信距離の上限を超えてネットワークを構築するには, コーディネータとエンドデバイス間にルータを設置し, 中継器を置く必要がある。このルータは基本的に間欠動作をすることができず, 常時動作状態にする必要があり, 比較的消費電力が多くなる [16, 17]。

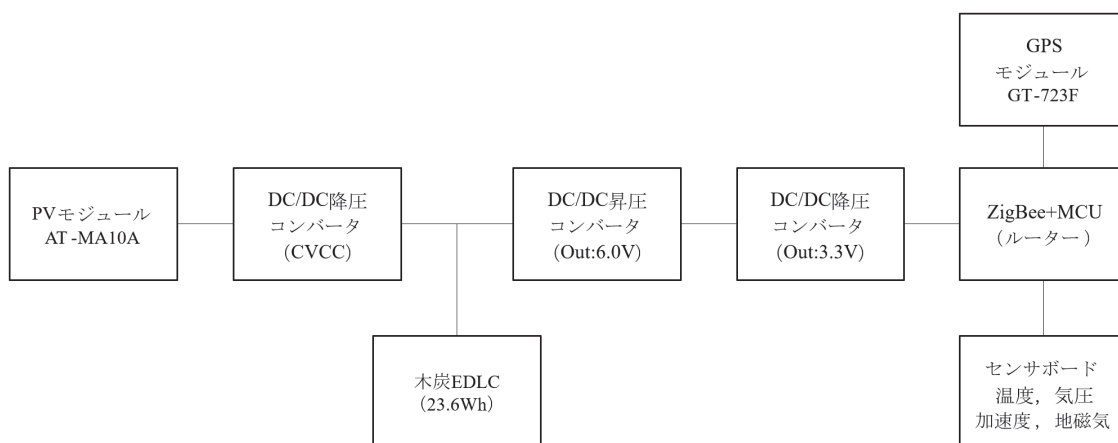


図 2.20 WSN システムのノードとして想定したブロック図

実験では, WSN を対象とした EDLC の電源を想定し, ノードの消費電力や設置場所を考慮すると, ルータ用の電源があればルータとエンドデバイスの両方に適応できることになる。そこで, ZigBee 規格で複数のルータとコーディネータ 1 台で構成されるメッシュ型の WSN を構成して実験を行った。

それぞれのルータには, 複数のセンサを接続してセンサノードとしても機能するようにした。各センサと無線モジュールの接続には, ワンチップマイコン (Microchip Inc., PIC18F26K22-I/P) を経由して, 温度センサ (Texas Instruments Inc., LM92CIM), 気圧センサ (STMicroelectronics Inc., LPS331AP), 加速度センサおよび地磁気センサ

(STMicroelectronics Inc., LSM303DLHC), GPS モジュール (CanMore Electronics Co. Ltd., GT-723F) を接続した。製作した WSN ルータの消費電力は、平均で 0.7 W 程度となっている。

WSN ルータの電源システムでは、定格出力電力 10 W の PV モジュール (Autumn Technology K.K., AT-MA10A) を用い、発電した電力を 23.6 Wh の蓄電容量を有する EDLC に蓄電する構成とした。

急速充電が可能な EDLC の長所を活かし、最大 5 A で充電が可能な充電制御回路を開発して接続した。充電の際には、PV モジュールの発電効率を高めるため、MPPT(Maximum Power Point Tracking) 制御 (最大動作電圧追従方式) を行っている。

EDLC の電力出力には、EDLC の端子電圧が電力の出力とともに低下するために安定化する制御を必要とする。出力を安定化する制御回路は、昇圧型 DC/DC コンバータを接続し、EDLC の端子電圧が 6.0 V から 1.25 V のときに出力電圧を 6.0 V に維持できるよう設定した。製作した電源装置の設定では、EDLC に蓄電した電力の 95% を使用可能となる。

WSN ルータの動作電圧は 3.3 V であるため、EDLC の出力電圧を安定化させた後、降圧型 DC/DC コンバータを用いて電圧を調整して電力を供給する構成とした。

2.5 実験結果と検討

図 2.21 に試作した WSN システムの設置状況と外観を示す。EDLC を電源システムの実験については、PV モジュールで発電した電力と EDLC 充放電した電力をデータロガー GL-100(GRAPHTEC) と 4ch 電圧/温度端子 GS-4VT(GRAPHTEC) を用いて計測した。PV モジュールの端子電圧および出力電流と、EDLC の端子電圧と電流を計測し、シャント抵抗 10 mΩ をそれぞれに接続して電流計測した。

開発した EDLC を使用した電源システムは、WSN ルータや PV モジュールと共に本校敷地内の屋外に設置され、2017 年 5 月 16 日～2017 年 5 月 20 日の間で電力の入出力を測定した。



図 2.21 試作した WSN システムの設置状況と外観

図 2.22 に WSN システム用電源装置の実験結果を示す。これらの結果から、PV モジュールの定格出力電力の 15% の発電があれば、発電した電力の余剰分を EDLC の充電に充てることができた。また、EDLC に 40% 程度の電力量が残っていると、夜間に WSN を動作させることが可能であった。EDLC に蓄電されている使用可能な電力量の割合 η_{RP} は、次式で算出された。

$$\eta_{RP} = \frac{V_{EDLC}^2 - V_L^2}{V_m^2 - V_L^2} \cdot 100 \quad (2.15)$$

晴天時には、日の出から約 4 時間 30 分で充電が完了しており、EDLC の特徴である急速充電を実現している。また、日射量が少ない日においても EDLC に対する若干の充電と WSN ルータへ電力供給を実現しており、悪天候の日でも数日の連続動作が可能である。

悪天候時における WSN ルータの連続動作日数は、蓄電容量と消費電力の関係がある。そのため、設置する場所に応じて仕様を変更する必要があるが、PV モジュールの容量変更や、EDLC を並列に接続して容量を増やすことで対応可能であるため、EDLC を用いた電源装置は WSN ルータの電源として有効であると考えられる。

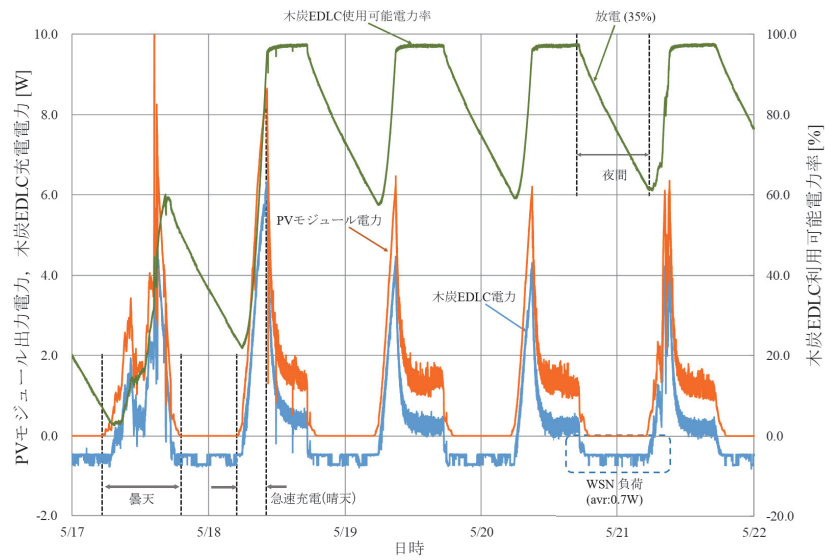


図 2.22 WSN システム用電源装置の実験結果

2.6 結言

WSN を遠隔地に設置することを想定して、PV モジュールと EDLC を用いた電源システムを開発し、屋外において実証実験を行った。これらの結果から、ZigBee 規格の WSN ルータを連続して動作できることがわかった。30 Wh の蓄電能力を有する EDLC では、夜間で消費する電力量は 40% 弱であり、悪天候の際にも数日間の連続動作が可能となる。

この他にも、独自に開発した EDLC は環境負荷が少なく安全性も高いため、遠隔地に設置することが多い WSN の電源として有用である。

実証実験では、試作した電源により中継器として稼働する WSN システムに連続して電源の供給が可能であり、4 日間程度は日照時間が少なくても運用できることを実証した。試作した電源システムは、環境負荷と劣化が少ない特徴を有する蓄電器を用いており、水田等の農作物を扱う場所では安全性を必要とするため、提案するシステムが有用であると考えられる。

参考文献

- [1] T. Otsuka, Y. Torii, and T. Ito, “An implementation of a WSN for disaster damage detection” , Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, vol.31, No.6, p.AI30-F_1-9(2016).
- [2] G. Zheng, L. Zhang, and J. Li, “An energy supply system for wireless sensor network nodes” , International Journal of Distributed Sensor Networks, vol.8, Issue5, pp.1-6(2012).
- [3] S. Saruwatari, T. Morito, M. Minami, and H. Morikawa, “A batteryless wireless sensor network and its memory saving data collection protocol” , Journal of Information Processing, vol.55, pp.326-339, (2014).
- [4] F. Barzegar, D. Y. Momodu, O. O. Fashedemi, A. Bello, J. K. Dangbegnon and N. Manyala, “Investigation of different aqueous electrolytes on the electrochemical performance of activated carbonbased supercapacitors” , RSC Advances, Issue5, pp.107482-107487(2015).
- [5] M. Fukuma, S. Okada, Y. Fukushima, N. Takahashi, T. Uchida, J. Ogawa, and K. Yoshino, “1kWh Class Electric Power Storage using Charcoal EDLCs” , IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Vol. 137, No.3, pp.186-187(2017).
- [6] 日野 太郎, 森川 鋭一, 串田 正人 共著：“基礎電気・電子工学シリーズ電気・電子材料”, 森北出版 (1991).
- [7] 泉 生一郎 他著：“基礎からわかる電気化学”, 森北出版 (2009).
- [8] 梅尾 良之 著：“新しい電池の科学”, 講談社 (2006).
- [9] 山田 哲, 山城 迪, 佐々木 正和, 荒木 修一, “電気二重層キャパシタの等価回路モデルに関する一考察”, 電気学会論文誌B, 第 123 巻, 第 8 号, pp.1011-1017(2003).
- [10] 木下 繁則 著：“電気二重層キャパシタ「EDLC」の特性と上手な使い方”, 日刊工業新聞社 (2010).

- [11] S. Yamashiro, K. Nakamura, M. Sasaki, S. Araki, S. Kinoshita, H. Matui, K. Izaki, “Method for measuring EDLC capacitance based on energy equation” , The Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, vol.29, No.3, pp.240-245(2009).
- [12] 足立 修一, 廣田 幸嗣, 丸田 一郎 他著：“バッテリーマネジメント工学”, 東京電機大学出版局 (2015).
- [13] 馬場 清太郎 著：“電源回路設計 成功のかぎ”, CQ 出版 (2009).
- [14] 戸川 治朗 著：“スイッチング電源のコイル/トランス設計”, CQ 出版 (2012).
- [15] T. Ritsu, “ZigBee wireless sensor networks” , The Journal of the Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, vol.31, No.11, pp.854-857(2011).
- [16] 池永 全志, 四方 博之, 長谷川 晃朗, 阿部 憲一, 野林 大起, 伊藤 哲也, “Radio on Demand Networks 技術による無線アクセスネットワークの省電力化”, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J99-B, No.4, pp.261-274, (2016).
- [17] 河合 佑介, 稲葉 友紀, 渡辺 尚, “環境発電型無線センサネットワークの送信電力制御について”, 研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), 2012-UBI-34, 第 9 号, pp.1-6(2012).

第3章

木炭 EDLC を用いた 独立電源システム

3.1 序言

LED の発明により，照明機器の大幅な省電力化が実現されている [1,2]．LED を利用した屋外照明を PV モジュールのみの電力で動作させるためには，蓄電池などのエネルギーを蓄える機器を併用しなければならない．一般的に独立型の照明機器は，蓄電デバイスとして鉛蓄電池やリチウムイオン二次電池などを利用した機器が製品化されている [3,4]．また，照明が LED の利用により大幅に省電力化されたことで，エネルギー密度が低い EDLC などの蓄電器も利用できると考えられる．

EDLC は，第 2 章で述べたように電解液イオンの電極表面への物理的吸脱着現象を利用し，充放電を行う．このため化学反応を利用する二次電池と比較するとエネルギー密度は小さいが，低温動作，高効率，充放電による劣化が小さいことや急速充放電が可能などのいくつかの特長がある [5]．

著者らは，これまでより安価で安全な EDLC 蓄電装置を実現する方法について研究を進めてきた [6]．アルカリ賦活により活性炭を作製し，賦活材と同じ水溶液系電解液を利用する方法で EDLC を作製した．蓄電時のエネルギー密度は，約 2 Wh/L と市販の EDLC よりも小さいが，木炭，紙，水酸化カリウム (KOH) などの安価な材料により，安全で劣化が殆どない木炭 EDLC が実現できることを見出した [7]．

木炭 EDLC の耐水性，急速充放電，高効率や低温動作などの特長を生かし，屋外照明を太陽光発電のみで利用するための電源装置を木炭 EDLC およびその制御回路を含めて試作し，屋外に設置することでその動作を確認した．また，設置後，2 年 4 ヶ月が経過し

た屋外照明について、劣化状態なども確認した。本章では、これらの木炭 EDLC を利用した屋外照明用電源装置の試作と実証実験の結果を記述する。

次に、オフグリッドでの利用が期待される小電力の機器として、センサネットワークや Wi-Fi などの通信機器がある [8]。PV モジュール等により発電した電力をこれら機器に対して給電するには、天候に左右されるため不安定なる。このため発電装置と共に蓄電装置を併用しなければ、これら機器を 24 時間利用するのは難しい。

Wi-Fi を対象とした電源装置として、435 W の PV モジュール、200 Wh 級 EDLC およびその制御回路を組み合わせた電源装置を試作し、消費電力 8.4 W の Wi-Fi 機器を負荷として、24 時間連続稼働させた実験結果を報告する。また、EDLC に蓄電される電力量は、定格電圧 V_C の二乗に比例するため、定格電圧を高く設定した方が効率的に電力を使用することができる。そこで、木炭 EDLC を直列に接続する数を変え、定格電圧を 6 V と 12 V の仕様に設定した蓄電器の違いについても実験を行った。

さらに、太陽光や風力などの再生可能エネルギーにより発電された電力を電気機器で利用するには、その不安定さを軽減するために蓄電池もしくは蓄電器を併用するのが有効である。一般家庭では、4 kWh 以上の蓄電装置と PV モジュールを組合せることで、昼間は太陽光で発電した電気を使用し、夜間は蓄電した電気を使用することができる。この家庭用蓄電装置には、鉛蓄電池やリチウムイオン二次電池を用いたシステムの運用がなされている [9, 10]。

前述のとおり、EDLC は二次電池と比較して様々な特長がある。しかし、現状では、EDLC のエネルギー密度が二次電池と比較して低く、数 kWh の大容量の EDLC は費用対効果が極めて低く、家庭用蓄装置の蓄電デバイスとして利用されていない。

再生可能エネルギーの利用を目的として、1 kWh の木炭 EDLC と充放電用の制御回路を試作し、800 W の PV モジュールを利用して、蓄電装置を構成した。その蓄電装置に、室内用照明灯 (50 W) の連続点灯や液晶 TV (30 W) を負荷接続した場合の動作実験を行った。木炭 EDLC を利用した家庭用蓄電装置の可能性について検討を行い、1 kWh 級の蓄電装置の試作結果について報告する。

3.2 屋外照明灯用電源システム

3.2.1 木炭 EDLC を用いた屋外照明灯の設計・製作

屋外照明灯は、LED 照明 (アイエール電器, BH-DC12V-27LW, 6 W), PV モジュール (YMT ENERGY, MSP60W12V, 60 W, 600 mm × 600 mm), 4 ユニットの木炭 EDLC (6.0 V, 60~80 Wh) と独自の制御回路で構成された。

木炭 EDLC が有する性能として、蓄電容量 P_C の測定を行った。蓄電容量 P_C の計測は、直流安定化電源 (高砂製作所, KX-100L) と電子負荷 (ティアンドシーテクニカル, 3710A) を用い、4 ユニット並列接続した木炭 EDLC を充放電し、第 2 章で記述した手法により負荷を定電力負荷にして行った。

充放電して実験する際、木炭 EDLC の充電は、直流安定化電源を用いて木炭 EDLC ユニットの定格電圧である 6.0 V まで定電圧定電流 (CVCC: Constant Voltage Constant Current) 制御 (6.0 V, 10 A) に設定して 5h 充電した。放電時は、電子負荷を定電力負荷モード (6 W) に設定して 15 h 放電させた。また、放電時間については、屋外照明での木炭 EDLC の利用を考慮し、定格電圧から端子電圧が 2.0 V まで低下する時間とした。

図 3.1 に木炭 EDLC (4 ユニット) の定電力負荷による蓄電容量の測定結果を示す。これらの結果から、放電時間は 11 時間 11 分であり、負荷電力 P_L を 6 W としたため、蓄電容量 P_C は 67.1 Wh であることがわかった。

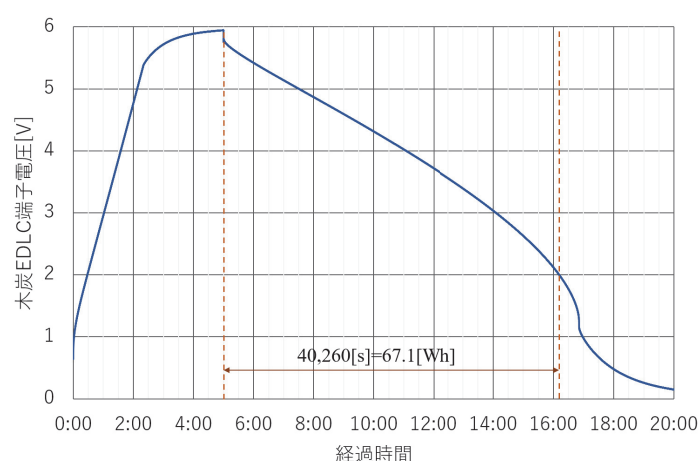


図 3.1 木炭 EDLC (4 ユニット) の定電力負荷による蓄電容量の測定結果

図 3.2 に試作した屋外照明の外観を示す．照明を点灯させる時間は，PV モジュールの端子電圧を利用して制御された．PV モジュールの出力電圧が 4.8 V を下回った場合に LED 照明が点灯し，点灯後 10 時間または EDLC の電圧が 2.0 V 以下になった場合に LED を消灯するよう設定した．屋外照明灯は地上から 2.4 m の位置にある．PV モジュールは，地面より 30 ° 傾けて設置できるように架台を設けた．



図 3.2 試作した屋外照明灯

3.2.2 木炭 EDLC の充電および出力制御回路の設計・製作

EDLC を蓄電装置として利用する場合には、EDLC の長所である急速充電に対応した充電制御回路を必要とする。また、EDLC の端子電圧は、残存する電力量に応じて低下するため、充電制御回路からみると EDLC 負荷は短絡状態と同等となるため、特に完全放電時から充電する際には電流量を確保した回路設計をする必要がある。さらに、EDLC の端子電圧が定格電圧を超えた場合には、キャパシタ内部で電解液の電気分解を生ずるため、定格電圧を超えないよう設計する必要がある。

図 3.3 に木炭 EDLC 充電制御の回路構成、図 3.4 に試作した木炭 EDLC 充電回路を示す。充電制御回路には、マイクロコントローラ (Microchip Inc., PIC16F1823) を用いて降圧型 DC/DC コンバータを構成し、充電電流と木炭 EDLC の端子電圧をモニタすることにより CVCC 制御を行った。さらに、充電制御回路の入力電圧をモニタし、PV モジュールの最大動作点電圧を追従する制御を行った。充電時の最大電流は 20 A とし、入力電力が 80 W まで対応できる設計とした。

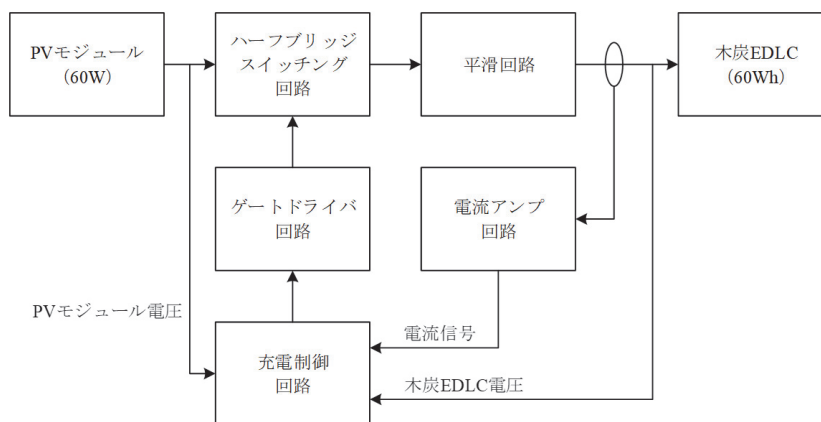


図 3.3 木炭 EDLC 充電制御の回路構成

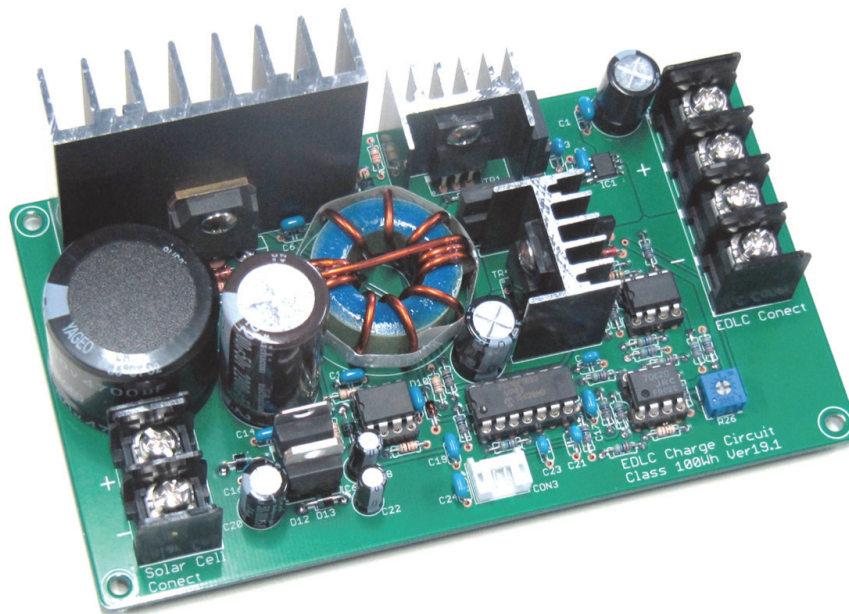


図 3.4 試作した木炭 EDLC 充電回路

図 3.5 に充電制御回路の効率を測定する回路の構成を示す。PV モジュールを模擬した電源として直流安定化電源 (高砂製作所製, KX-100L) を制限電流 4.44 A に設定して接続し、蓄電器として 4 ユニットの木炭 EDLC を 2 直列 2 並列に接続して、合わせて約 55 Wh の電力容量を有する木炭 EDLC を接続することにより充電制御回路の変換効率は求められた。この時、充電制御回路への入力電力は、充電制御回路が入力電圧を 18 V に維持するよう制御するため、上限の入力電力 80 W となる。

充電回路の入出力電力は、充電制御回路の入出力の電圧と電流を測定し、計算により求められた。電流と電圧は、データロガー (GRAPHTEC, GL200A) を使用して、入出力それぞれに接続したシャント抵抗 (Arcol, MSR-5R01F, 10 m Ω) の両端の電圧と端子電圧を 1 s 間隔で測定した。

図 3.6 に充電制御回路の効率測定結果を示す。これらの結果から、充電制御回路は 82% から 94% の範囲で EDLC への充電が可能であり、PV モジュールで発電した電力を効率的に EDLC へ充電できることがわかった。



図 3.5 充電制御回路の電力変換効率を測定する回路の構成

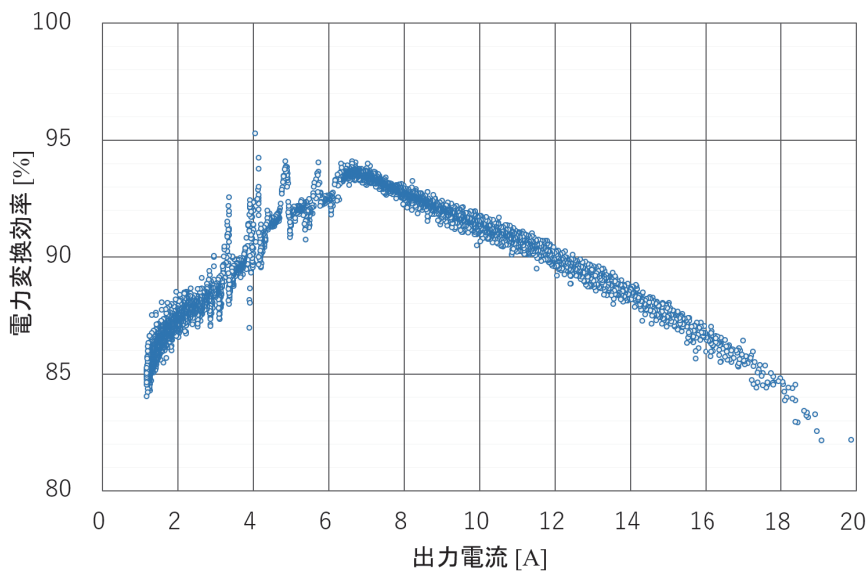


図 3.6 充電制御回路の変換効率測定結果

EDLC では、蓄電された電力量に応じて端子電圧が低下する。このため、EDLC に接続する機器を安定して動作させるためには、出力電圧を安定化する制御回路が必要となる。

図 3.7 に木炭 EDLC の出力制御回路構成を示す。木炭 EDLC の出力制御回路には、昇圧型 DC/DC コンバータを採用した。製作した出力制御回路は、木炭 EDLC の端子電圧が 12 V から 1.8 V において、最大 12 W の負荷に対して 12 V \pm 5% の出力電圧を供給できる設計とした。

図 3.8 に試作した出力制御回路を示す。出力制御回路は、負荷への電力供給が不要な場

合に昇圧回路と負荷との接続を切り離す必要があるため、出力に MOSFET によりスイッチする回路を付加した。この他に、昇圧回路には、LED 照明に電力を供給しない時にスタンバイ状態にできる外部端子を設けた。

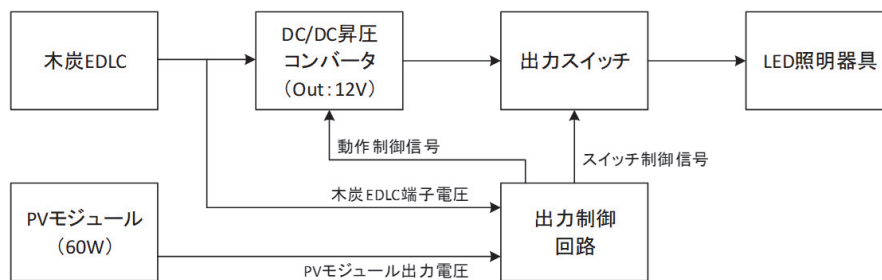


図 3.7 木炭 EDLC の出力制御回路構成

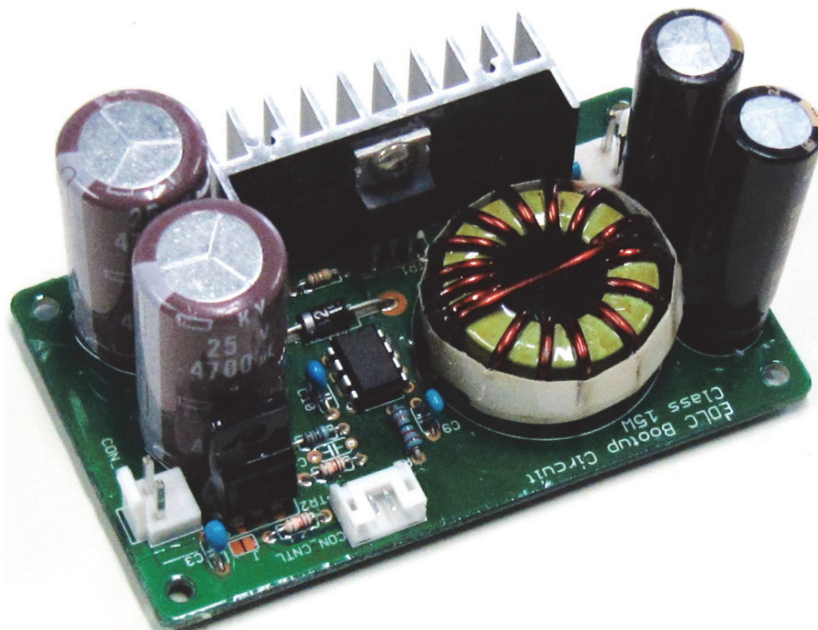


図 3.8 木炭 EDLC の出力制御回路

出力制御回路の特性では、入力電圧を変化させた際の実出力電圧の変化と電力変換効率は測定された。入力電圧、出力電圧と出力電流の測定には、デジタルマルチメータ (Texio, DL-2051) を使用した。入力電流は、シャント抵抗 $5\text{ m}\Omega$ (Riedon, RSA-20-100) を接続し、デジタルテスター (SANWA, PC5000) により抵抗間の電圧を測定して求められた。

測定する際の入出力には、入力電源として直流安定化電源 (高砂製作所製, KX-100L), 出力に接続する負荷として固定抵抗 12Ω (Vishay, RH02512R00FE02) を使用した.

図 3.9 に出力制御回路の出力特性と変換効率の測定結果を示す. 出力制御回路は, 入力電圧が 1.8 V の時に出力電圧が 11.85 V であった. したがって, 設定した仕様を満足する出力が得られた. また, その際の電力変換効率は 85% 以上であり, 効率的な電力の変換も可能であった.

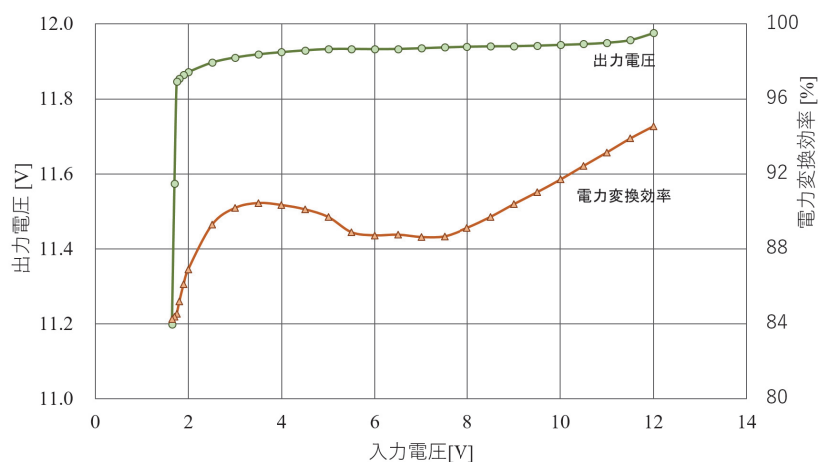


図 3.9 出力制御回路の出力特性と変換効率

3.2.3 実験結果と検討

実証実験は、2015年9月8日から松江工業高等専門学校内(鳥根県松江市西生馬町)の敷地に開発した屋外照明を設置して行われた。照明灯の動作は、PVモジュールの出力電圧と木炭EDLCの端子電圧、LED照明灯への供給電圧をデータロガー(GRAPHTEC, GL100+GS-4VT)により10s間隔で測定することで動作の確認をした。

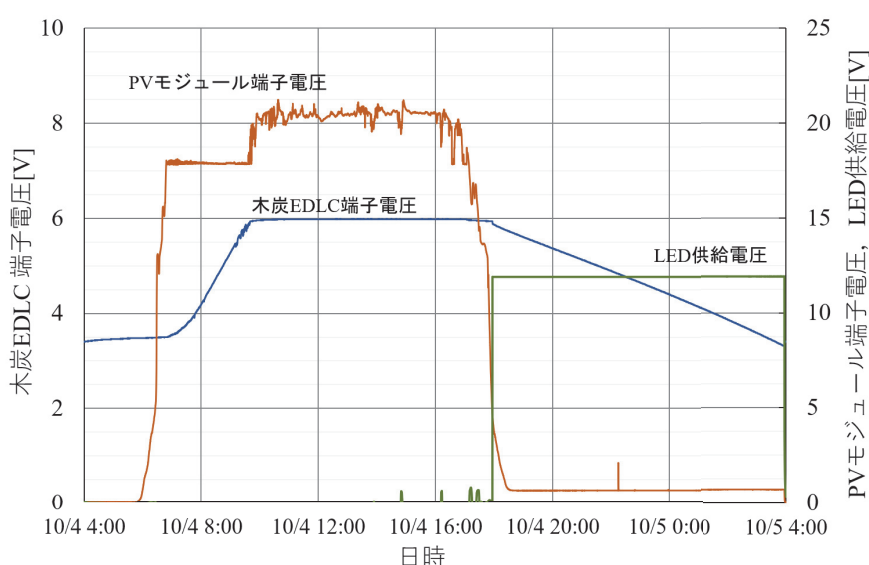


図 3.10 屋外照明灯設置直後の動作状態

2015年10月4日に測定した結果を図3.10に示す。設置した屋外照明は、日射量の少ない日の出から3時間30分程度で満充電に達し、日没後に照明を10時間点灯することを確認した。木炭EDLCの端子電圧は、10時間の照明点灯終了後に3.3Vであったため、電力容量に若干の余裕があることになる。

実証実験前に木炭EDLCの蓄電容量を計測した際、4ユニットの木炭EDLCが有する蓄電容量は67.1Whであり、6WのLED照明灯を9時間程度の点灯にとどまるはずである。しかし、実際には定格6WのLED照明灯の消費電力を計測すると3.7W程度であった。これより、制御回路や木炭EDLCが持つ内部抵抗で生じる損失等があるにもかかわらず、LED照明灯は10時間以上の点灯が可能であることがわかった。

3.2.4 2年4ヵ月経過後の動作状況

2015年に屋外照明を設置してから2年4ヵ月間、毎日充放電を繰り返して使用した際の屋外照明の動作を確認するため、以前と同様に各部の電圧をデータロガーにより計測して動作の確認を行った。計測は、2018年1月15日(曇時々晴)に行った。

図3.11に2年4ヵ月経過後の動作状況を示す。長期の動作し続けた屋外照明は、日照の影響により充電に時間を要しているものの、夜間に7時間の照明点灯を確認できた。設置時よりも点灯時間が短い原因としては、EDLCと制御回路間の配線に腐食が見られ、電解液の減少による静電容量低下と直列抵抗の増加が主な原因として考えられる。実証実験結果では、EDLC端子電圧が照明点灯直後において、電圧降下と照明点灯時の電圧降下量が増加することがわかった。

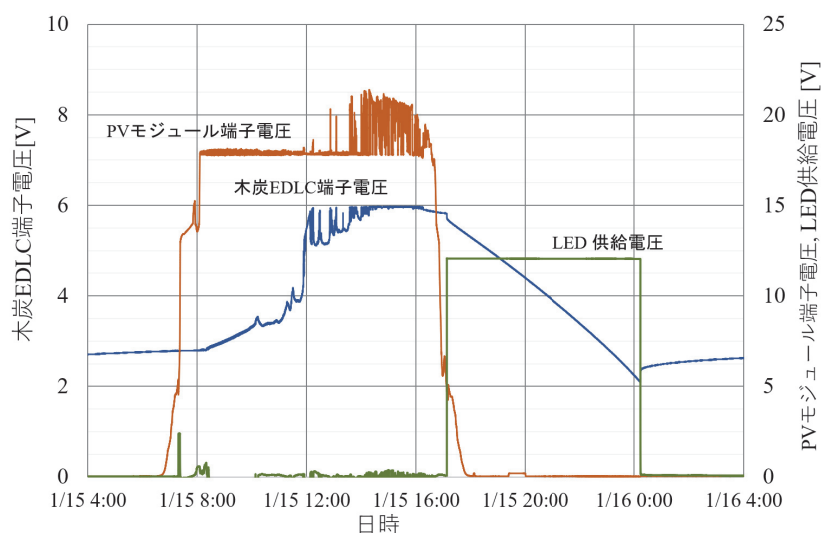


図 3.11 2年4ヵ月経過後の動作状況

3.3 オフグリッド Wi-Fi 連続稼働電源システム

3.3.1 木炭 EDLC の直列接続

木炭 EDLC を蓄電装置として用いるためには、放電と共に低下する木炭 EDLC の端子電圧を一定に維持する出力制御回路の付加が必須となる。木炭 EDLC に蓄電されている電力を利用できる割合 η_p は、木炭 EDLC の定格電圧 V_C と出力制御回路の最低動作電圧 V_L で決まり、式 (2.14) で算出される。ただし、 V_m は木炭 EDLC の定格電圧 V_C とする。

出力制御回路の最低動作電圧を一定とした場合、木炭 EDLC の定格電圧が高い方がより多くの電力を利用できるため、蓄電装置の利用率 η_p が高くなる。以前に開発した出力制御回路では、最低動作電圧が 1.8 V であるため、木炭 EDLC の定格電圧を 6 V に設定した場合、蓄電された電力の利用率 η_p が 91.0% となる。一方、木炭 EDLC の定格電圧を 12V に設定した場合の利用率 η_p は 97.8% なるため効率的な電力の利用が可能となる。

また、木炭 EDLC の蓄電電力 W_P は定格電圧 V_C と静電容量 C から式 (2.2) により計算できる。同一の蓄電容量を有する木炭 EDLC であれば、定格電圧 V_C が高い方が少ない静電容量となる。木炭 EDLC の電圧は、次式より静電容量が少ない方が同じ充電電流 I_C であっても早く上昇が可能であるため、充電回路への負担軽減ができる。

$$V_c = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \cdot I_c \cdot t \quad (3.1)$$

ただし、木炭 EDLC を直列に接続する際、それぞれの木炭 EDLC が有する静電容量が異なると、分担電圧に差が生じるため、電解液の電気分解電圧を超える恐れがある。この研究において製作した定格電圧が 12 V の木炭 EDLC は、構成する 12 セルの静電容量を合わせ、分担電圧が同一になるよう製造した。製造した木炭 EDLC では、各セルに加わる電圧を確認するため、直流安定化電源と固定抵抗により充放電し、その際の各セルの端子電圧をデータロガーにより測定した。

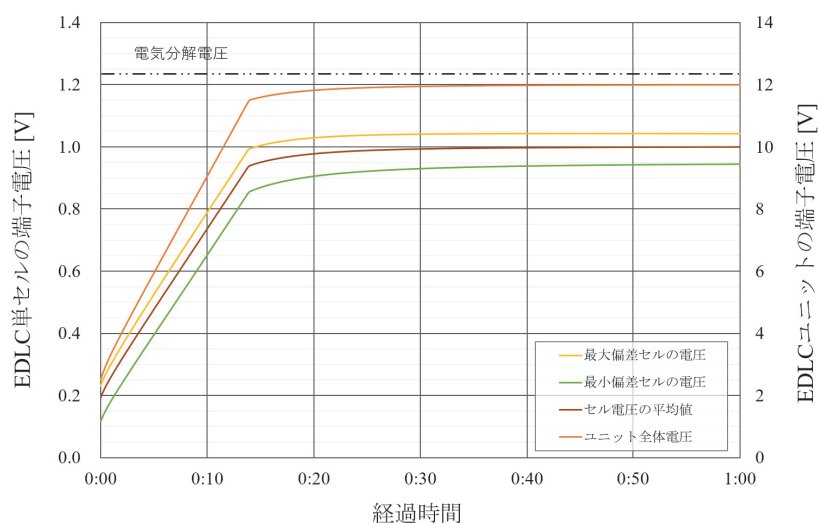


図 3.12 木炭 EDLC の各セルに加わる電圧の最大値，最小値と平均値

図 3.12 に木炭 EDLC の各セルに加わる電圧の最大値，最小値と平均値を示す。蓄電装置となる木炭 EDLC は，200 Wh の電力容量を満たすため，2 つの静電容量が同等な木炭 EDLC のユニットを直列に接続して，定格電圧を 12 V とした木炭 EDLC を 1 セットとし，10 セットを並列に接続し，合計 20 ユニットで必要な電力容量を有する蓄電器を製作した。

製作した木炭 EDLC の蓄電容量は，直流安定化電源 (Texio, PSF-400L) と電子負荷 (計測技術研究所, LN-300A-G7) を用いて，一定時間の充電と放電を行うことで計測された。充放電の切り替えには，電磁リレー (OMRON, 形 G9EC-1 DC12) を用いた。電力容量の測定では，電子負荷を 10 W, 15 W, 20 W の定電力負荷に設定し，EDLC の端子電圧と出力電流をデータロガーにより 1 s 間隔で測定した値を積算することで測定された。出力電流は，シャント抵抗 (ムラタエレクトロニクス, 3020-01108-0, 1 mΩ) の電圧を測定して換算された。

図 3.13 に蓄電容量と直列内部抵抗の測定結果を示す。これらの結果，製作した木炭 EDLC の蓄電器は，Wi-Fi システムの消費電力を想定して 20 W の負荷を接続した場合，蓄電容量が約 155 Wh であることがわかった。また，内部抵抗は 0.17 Ω であり，やや高めではあるが 20 W 程度の負荷であれば電力供給可能であると考えられる。

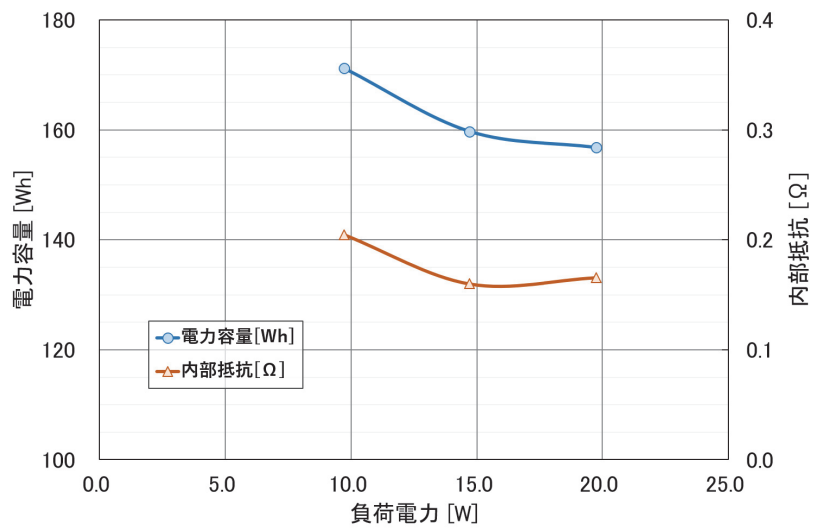


図 3.13 蓄電容量と直列内部抵抗の測定結果

3.3.2 200Wh クラス充電および放電制御回路の設計・製作

第3章第2節で報告した制御回路は、PV モジュールと木炭 EDLC による LED 照明灯を対象とした。80 W までの PV モジュールを用いて、最大 20 A の充電電流を流して木炭 EDLC を充電可能な充電制御回路 (80 W クラス EDLC 充電制御回路) を製作した。200 W クラス EDLC 充電制御回路では、充電時の温度上昇を抑えることと、電力変換効率の向上を目的として回路構成は改善された。

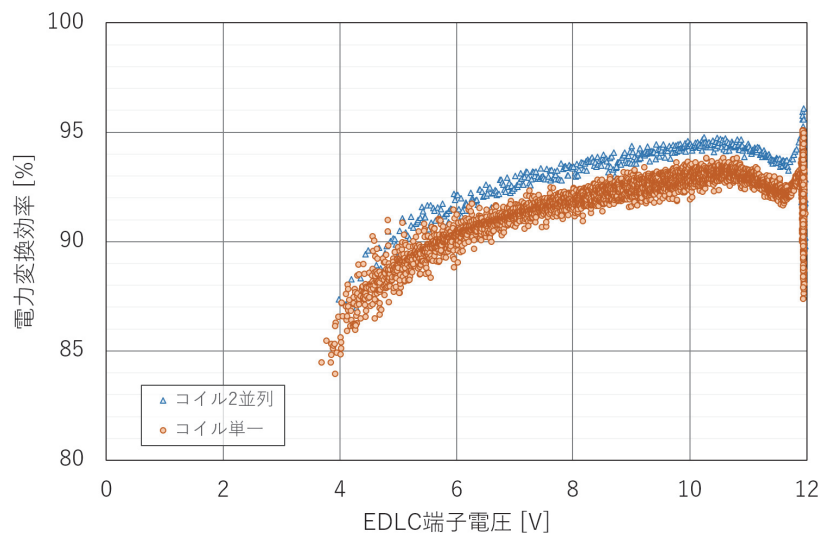


図 3.14 接続するコイル数による充電制御回路の電力変換効率

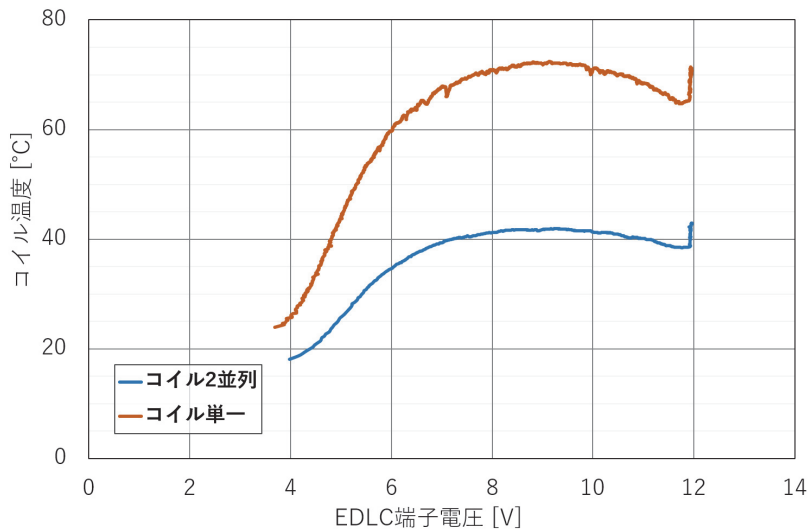


図 3.15 接続するコイル数による温度変化

図 3.14 に接続するコイル数による電力変換効率，図 3.15 に接続するコイル数による温度変化を示す．測定の結果，充電時において電力変換効率は平均で 1.4% 改善され，コイルの温度は改善前最大で 72.4 °C であったが，改善後 42.9 °C まで低下した．よって，コイルを並列に接続し，1 つのコイルに流れる電流を下げることにより，電力変換効率の改善と電流容量の向上を確認した．

図 3.16 に Wi-Fi 用電源システムの木炭 EDLC 充電制御回路構成を示す．この実験データをもとに，Wi-Fi 用電源システムのために開発した充電制御回路では，200 Wh の蓄電容量を有する木炭 EDLC に対応させるため，最大 40 A の電流で充電が可能な充電制御回路を製作した．これまで充電制御回路の性能を向上する手法として，主要なデバイスは複数個を並列に接続することで安価に性能を向上することができた．

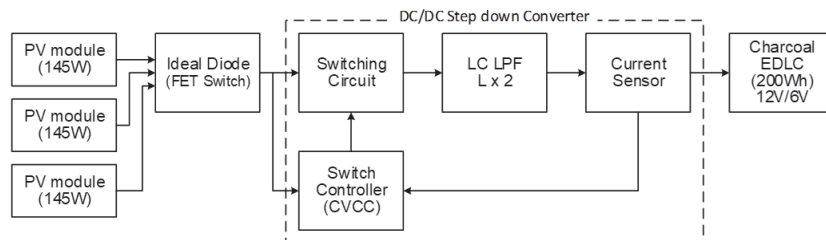


図 3.16 Wi-Fi 用電源システムの木炭 EDLC 充電制御回路の構成

Wi-Fi システムを構成する Wi-Fi アクセスポイントと WiMAX ルータへの電力は、LED 照明に使用した出力制御回路を通して供給された。出力制御回路が動作する入力電圧は、木炭 EDLC の定格電圧である 12 V から 3.0 V の範囲に設定された。

木炭 EDLC に出力制御回路を接続して電力を供給する時、蓄電器となる木炭 EDLC の内部抵抗 (配線等の抵抗も含む) により供給電圧が低下する。したがって、電圧降下を考慮して制御回路の動作点を決定する必要がある。特に木炭 EDLC の端子電圧が 3.0 V に近づくと、出力制御回路が一定の電圧を供給するよう制御するため、木炭 EDLC の出力電流や電圧降下も大きくなる。出力制御回路の入力電圧が動作範囲を下回り停止した際には、電圧降下が無くなり木炭 EDLC の端子電圧が再び増加する。

また、起動時の電流により電圧降下を生じ、動作範囲を下回る可能性がある。よって、出力制御回路の動作電圧を始動電圧と停止電圧の差を少なく設定した時、出力が不安定になり Wi-Fi システムに障害を与える可能性がある。このことから、出力制御回路の始動電圧は電圧降下を考慮して 3.0 V に設定し、1.0 V の余裕を持たせた。

図 3.17 に Wi-Fi 用の電源システムの電力制御回路、図 3.18 に Wi-Fi 用電源システムの構成を示す。木炭 EDLC による Wi-Fi 用の電源システムは、木炭 EDLC を 20 ユニット (約 200 Wh)、PV モジュール (ネクストエナジー・アンド・リソース, HA-145-12, 145 W) 3 枚と製作した充放電制御回路からなる。3 枚の PV モジュールは、MOSFET で構成した理想ダイオード回路を介して並列に接続し、DC/DC コンバータへ入力した。

駆動する Wi-Fi 機器の構成は、Wi-Fi アクセスポイントと WiMAX ルータで構成されており、それぞれの定格消費電力は 12.0 W と 6.0 W であり、定格電圧は 12 V である。これらの機器に対して木炭 EDLC から電力を供給するため、出力制御回路をそれぞれの機器に対して 1 回路ずつ接続し、安定して電力を供給できる構成とした。

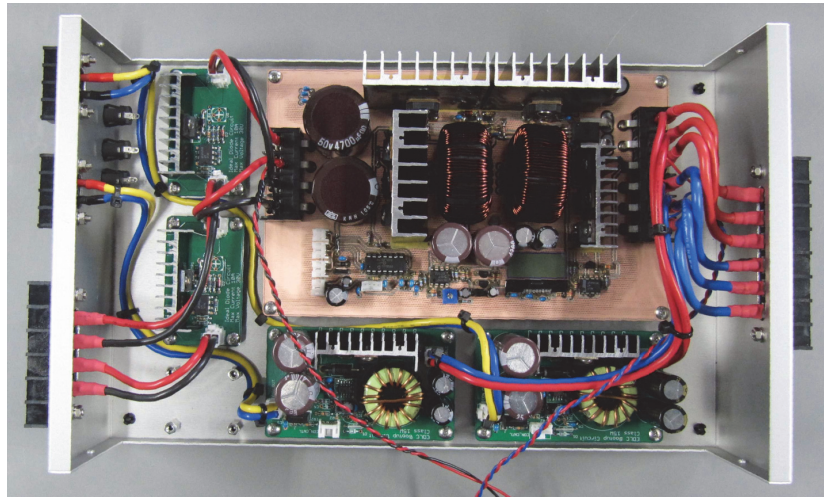


図 3.17 Wi-Fi 用の電源システムの電力制御回路

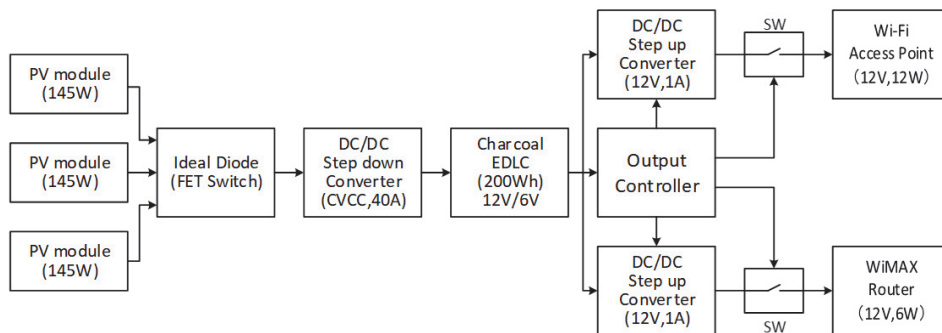


図 3.18 Wi-Fi 用電源システムの構成

3.3.3 実験結果と検討

オフグリッド環境における電力供給能力を確認するため、Wi-Fi 機器用に開発した PV モジュール (145 W × 3 枚) と木炭 EDLC(20 ユニット) を組み合わせた電源システムは、松江工業高等専門学校内 (島根県松江市西生馬町) に設置され予備実験が行われた。木炭 EDLC は、20 ユニットのすべてを並列に接続した定格電圧 6 V と、2 直列 5 並列に接続した定格電圧 12 V の 2 種類を用意し、同じ場所に設置して同時に実験を行った。制御回路の出力に接続した負荷は、Wi-Fi システムの定格消費電力を想定した固定抵抗 12 mΩ(12 W) と 24 mΩ(6 W) を接続し、合計で 18 W の消費電力となる負荷を選択した。PV モジュールの設置については、3 枚のすべてを一般的な南向きで傾斜角度を 30 ° とした。

実証実験では、PV モジュールの出力電圧、木炭 EDLC の端子電圧と Wi-Fi システムを仮定した抵抗への供給電圧をそれぞれデータロガー (GRAPHTEC, GL100+GS-4VT) を用いて、30 s 間隔での測定により動作確認した。

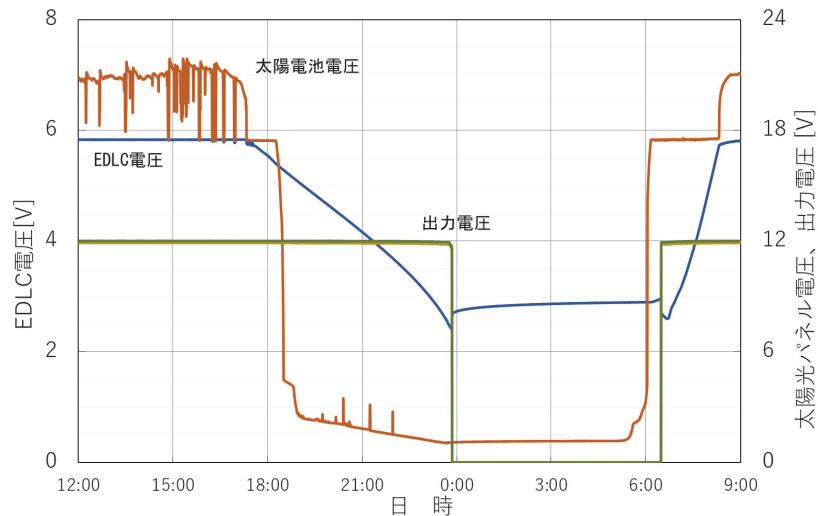


図 3.19 Wi-Fi 用電源システムの動作実験結果 (定格電圧 6 V)

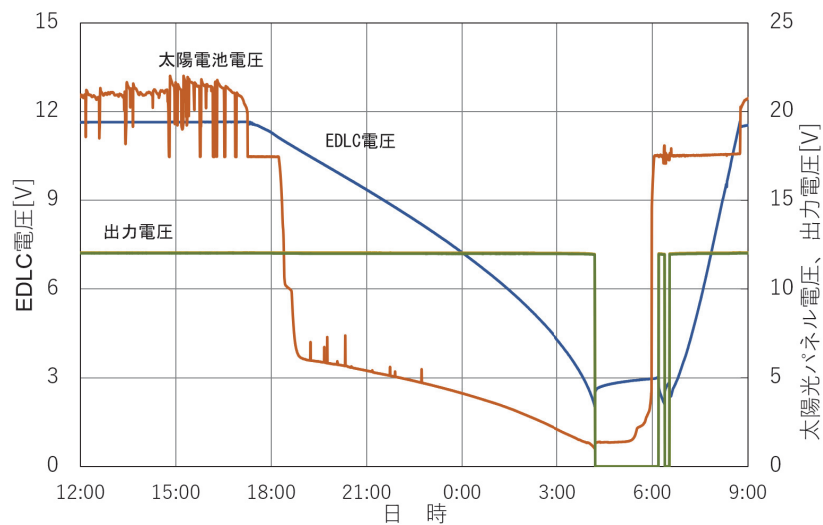


図 3.20 Wi-Fi 用電源システムの動作実験結果 (定格電圧 12 V)

2015 年 3 月 25 日～26 日の測定結果を図 3.19 と図 3.20 に示す．これら動作実験の結果から，PV モジュールからの電力供給が停止した後において，木炭 EDLC に蓄えられた電力による負荷への電力供給できることがわかった．また，木炭 EDLC の定格電圧を 12 V に設定した電源システムは，6 V に設定した電源システムより長時間動作したことがわかった．この実験では，夜間に電力供給が停止しているが，実際に設置する Wi-Fi システムの平均消費電力が 8.4 W と想定の 1/2 以下であったため，蓄電容量を変更せずに設置することとした．

木炭 EDLC を用いた電源システムによる 6 V と 12 V の Wi-Fi システムは，島根県松江市にある宍道湖周辺に設置された (2015 年 3 月 28 日)．

図 3.21 に Wi-Fi 用電源システムの設置状況を示す．PV モジュールの設置については，交通量の多い国道の近くが設置場所であったため，太陽光が車を運転する運転手に向けて反射しないよう PV モジュール 3 枚のうち 2 枚は水平に設置した．残り 1 枚の PV モジュールは，設置した場所が夕日の有名な観光地であり，夕方に Wi-Fi システムが稼働していることが重要である．故に，PV モジュールは日没の方角 (国道とは反対の方向) に向けて 78° の傾斜で取り付けられた．よって，PV モジュールの出力は，定格出力の合計が 435 W であるが，実際には少ない出力となっている．製作した電源システムの動作は，予備実験と同様にそれぞれの端子電圧をデータロガーにより測定することによって確認された．



図 3.21 Wi-Fi 用電源システムの設置状況

図 3.22 と図 3.23 に設置後の動作状況を示す。これらの結果から、木炭 EDLC の定格電圧が 6 V と 12 V のどちらも連続して 24 時間の電力供給が Wi-Fi システムに対して可能であることがわかった。木炭 EDLC の特性は、定格電圧が 6 V の電源システムでは、明け方に EDLC の端子電圧が 2.9 V(12.3%) まで低下した。一方、定格電圧が 12 V の電源システムは、明け方における EDLC の端子電圧は 8.7 V(49.8%) と蓄電容量に余裕があった。これらの結果から、高い定格電圧の木炭 EDLC は、蓄電電力を有効に使えることがわかった。さらに、4 年 8 ヶ月経過した時点 (2019 年 11 月 26 日) でも本 Wi-Fi システムは正常に動作している。

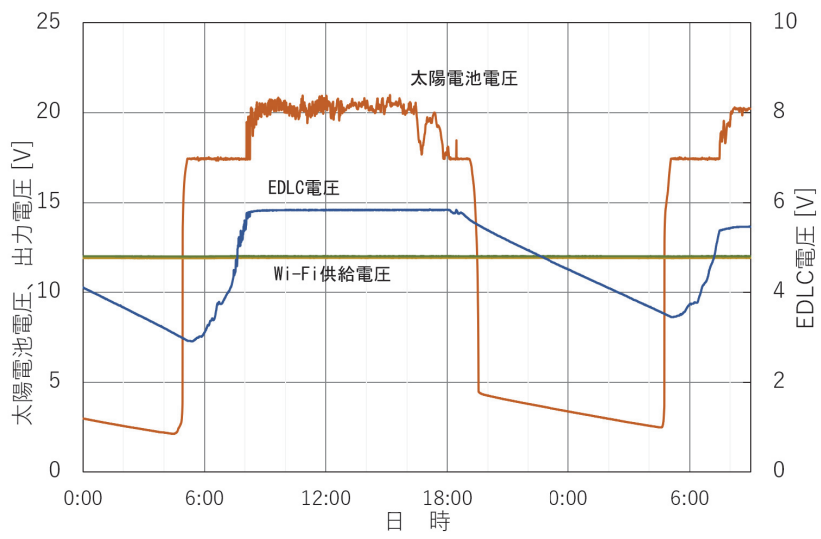


図 3.22 Wi-Fi 用電源システムの動作結果 (定格電圧 6 V)

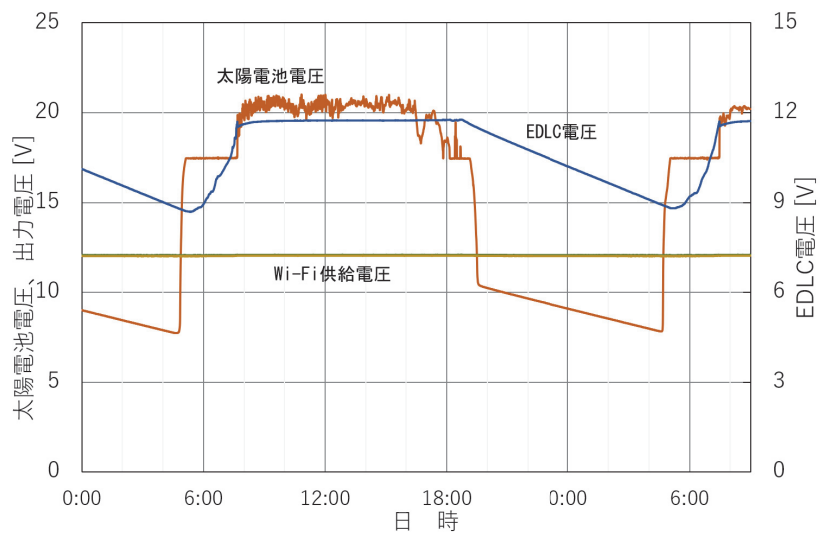


図 3.23 Wi-Fi 用電源システムの動作結果 (定格電圧 12 V)

3.4 1 kWh 級蓄電装置

3.4.1 大容量木炭 EDLC の特性

家庭用の電気機器を動作させるために 82 ユニットの木炭 EDLC を直並列接続 (2 直列 - 41 並列) し、1 kWh の蓄電容量を有する蓄電器を製作した。この蓄電器は、直流安定化電源 (Texio, PSF-400L) と電子負荷 (計測技術研究所, LN-300A-G7) を用いて充放電した際に、木炭 EDLC の端子電圧を計測することで蓄電容量を確認した。

図 3.24 に 1 kWh 級蓄電装置の蓄電容量を測定した際の回路構成を示す。蓄電容量の計測は、充電用 SW を ON にして直流安定化電源により木炭 EDLC を十分に定格電圧まで充電した後、充電用 SW を OFF にした直後、放電用 SW を ON にすることで定電流負荷モードに設定した電子負荷に接続し、平均 27.5 A の負荷電流で放電させた。その際に負荷に流れた電流値と端子電圧から放電した電力量を算出した。また、放電から 30 s 後の EDLC 端子電圧変化から内部抵抗を計算した。

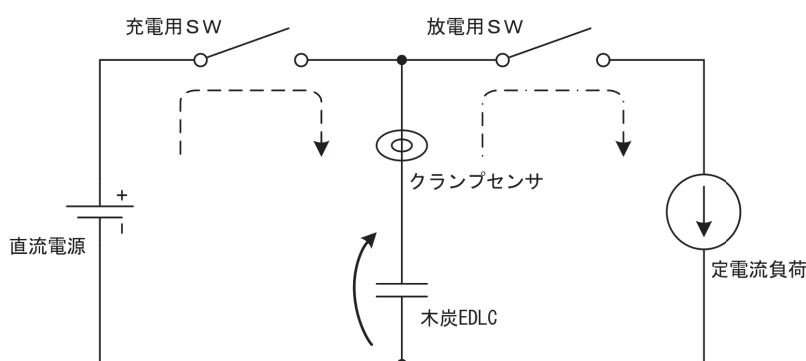


図 3.24 1 kWh 級蓄電装置の蓄電容量測定回路構成

電流の測定には、クランプメータ (三和電気計器, CL-22AD) を用いた。計測には、データロガー (GRAPHTEC, GL200A) を使用して、木炭 EDLC の端子電圧と電流を同時に記録した。

測定した木炭 EDLC の端子電圧、放電電流と積算放電電力を図 3.25 に示す。放電開始直後の蓄電装置端子電圧変化を図 3.26 に示す。これらの結果から、製作した EDLC 蓄電器は、1 kWh 程度の蓄電能力を有し、内部抵抗は 24 mΩ であることがわかった。

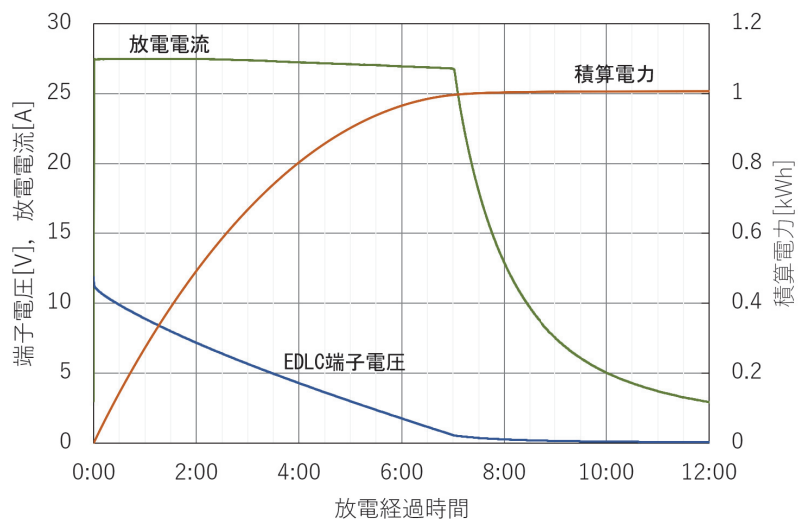


図 3.25 木炭 EDLC の端子電圧，放電電流と積算放電電力

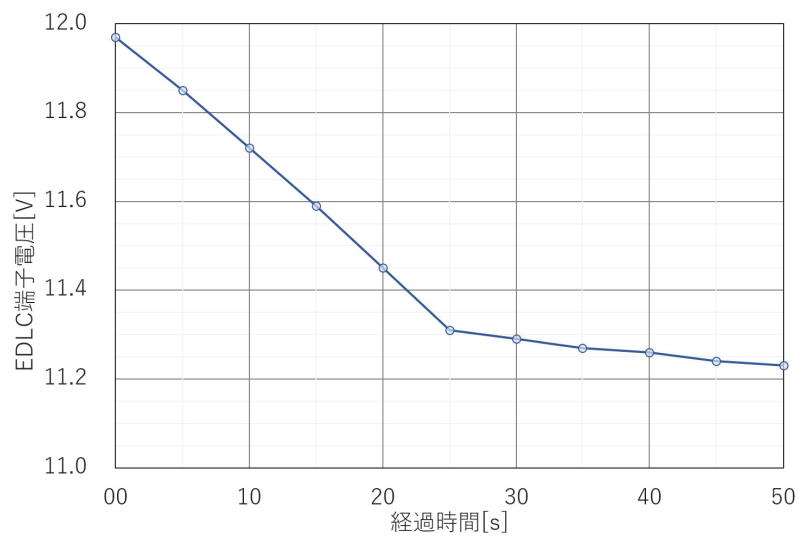


図 3.26 放電開始直後の蓄電装置端子電圧変化

3.4.2 大容量木炭 EDLC の充電および放電制御回路の設計・製作

EDLC を充電する際には、急速で電力の入出力ができる EDLC の特徴を活かすために大きな電流を扱うことのできる充電制御回路が必要となる。これまでに 200 Wh 程度の電力容量を有する木炭 EDLC を PV モジュールにより充電可能な制御回路を開発し、回路を構成するデバイスを並列に接続することで 1 つのデバイスに流れる電流を下げ、充電電流を確保する手法を用いた。

大型の EDLC を充電する場合には、入力電力も大きくなることから入力電流を下げるため、高い電圧に対応できる制御回路が必要となる。この実験では、24 V 系のシステムに用いられる PV モジュールを入力電源とする充電制御回路を設計・製作した。

充電制御回路は、非絶縁降圧型 DC/DC コンバータを基本にして構成され、マイコン (Microchip, PIC18F25K22) を用いて制御された。EDLC の端子電圧は、蓄電された電力が少ない場合に低い電圧となる。低い端子電圧で EDLC に充電する際は、充電回路から見た負荷は短絡に等しい状態となる。このため、LPF を構成するコイル、コンデンサとスイッチングデバイスに大きな突入電流が流れる。この突入電流を低く抑えるには、コイルのインダクタンスを高くする必要があるが、十分な充電電流を得るためにはインダクタンスの値をある程度低くする必要がある。この問題を解決するため、回路構成を 3 系統の降圧型 DC/DC コンバータを並列に接続し、市販されているコイルで扱える電流の範囲とした。また、並列に接続した DC/DC コンバータを同時に動作させる場合には、入力電圧を安定させるコンデンサに大きな電流が流れ、コンデンサのリプル電流が大きくなるため、それぞれのスイッチングデバイスが動作するタイミングを変えることで損失を抑える動作とした。

図 3.27 に 1 kWh 級蓄電装置の充電回路の構成を示す。電力の入力部は、4 枚までの PV モジュールを並列接続の入力を想定し、別の PV モジュールから電流の逆流防止と損失を低減させるため、MOSFET による理想ダイオードを構成した。また、充電の際には、PV モジュールの公称最大動作電圧を追従する制御とし、充電電流の最大値は 40 A、充電終止電圧は 12 V に設定された。

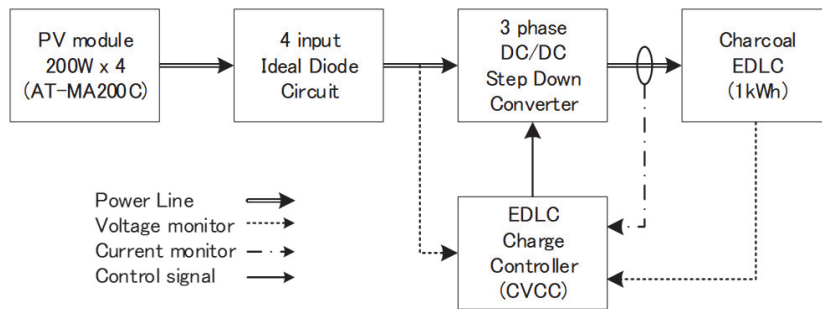


図 3.27 1kWh 級蓄電装置の充電回路の構成

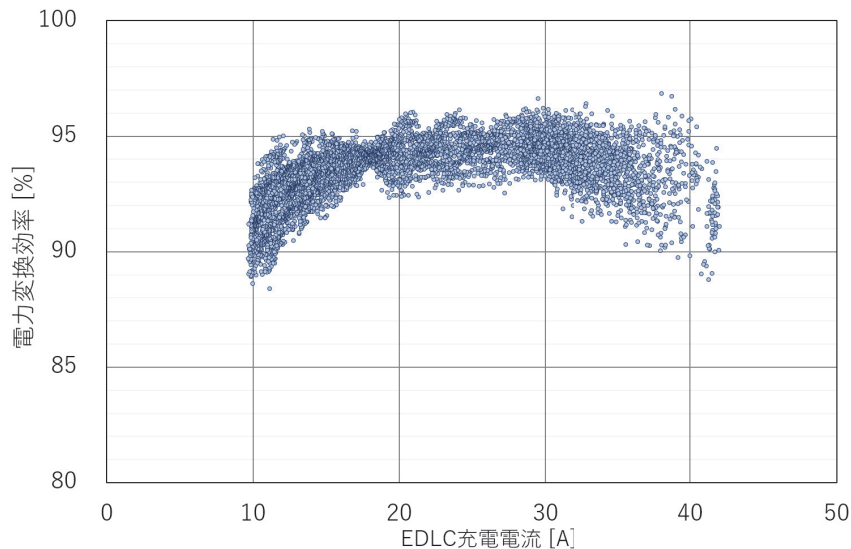


図 3.28 充電制御回路の充電電流に対する電力変換効率

直流安定化電源を用いて電力を供給し，充電の対象として 20 ユニットの木炭 EDLC(2 直列－10 並列) を使用し，制御回路の入力電力と出力電力をそれぞれの電圧と電流を測定することで，充電電流に対する電力変換効率を評価した．電流の測定には，シャント抵抗を使用し，入力側に 5 mΩ(Riedon, RSA-20-100)，出力側に 1 mΩ(ムラタエレクトロニクス, 3020-01108-0) の抵抗をそれぞれ挿入した．電力効率は，データロガーを使用して 0.5 s 間隔で記録し，充電電流が制限値である 40 A から 10 A に低下するまで計測された．計測時における電源は，電流制限を 10 A，電圧を 38 V に設定して供給された．

充電制御回路の充電電流に対する電力変換効率を図 3.28 に示す．これらの結果より，

充電制御回路の電力変換効率は 88.4% から 96.9% の範囲にあり、効率良く木炭 EDLC の充電ができることがわかった。木炭 EDLC を更に急速充電するには、より大きな電流を流すことが必要であるため、充電電流を 80 A まで対応可能な制御回路の開発を予定している。

木炭 EDLC に蓄電した電力を安定して機器に供給するため、100 W までの負荷に対応した出力制御回路を設計・製作した。充電制御回路と同様に、出力制御回路においても EDLC の端子電圧が低下すると、出力電力を一定に制御して入力電流を大きく流す必要がある。

出力制御回路は非絶縁型の DC/DC コンバータを基本とし、デバイスに流れる電流を分散させるため、2 系統の昇圧型 DC/DC コンバータを並列接続の構成とした。充電回路と同様に、昇圧回路の駆動は入力部のコンデンサにかかる負担の軽減を目的として、スイッチングデバイスが駆動する位相をずらして動作させた。

非絶縁型昇圧回路には、回路の特性としてスイッチングデバイスを駆動しない待機状態において、出力側に入力の電圧が出力されるため、出力側に MOSFET を用いてスイッチを設けた。スイッチに使用した MOSFET は、導通状態において ON 抵抗が低い N チャネル型のデバイスを使用し、ゲート駆動用の電源回路を別に用意した。

図 3.29 に 1 kWh 級の出力制御回路の構成を示す。出力制御回路の動作は、EDLC の端子電圧をモニタして入力電圧が低下した際に過大な電流が流れるのを防止するため、EDLC の端子電圧が 12 V から 5 V の範囲で昇圧動作するよう制御を行った。また、過負荷となった際にも回路を保護するため、出力電圧が低下した際に出力側に設けたスイッチを OFF にする設定とした。この他に、定格電力が 100 W までの屋外照明にも対応できるように、制御プログラムの変更により PV モジュールの出力電圧に応じて出力状態を制御できる構成とした。

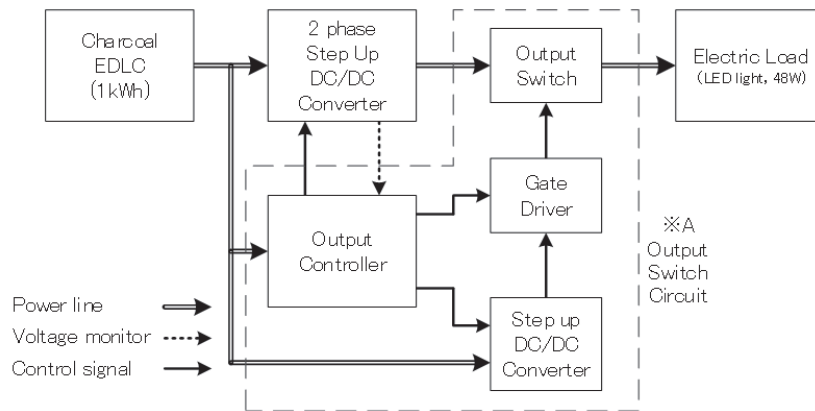


図 3.29 1 kWh 級の実出力制御回路の構成

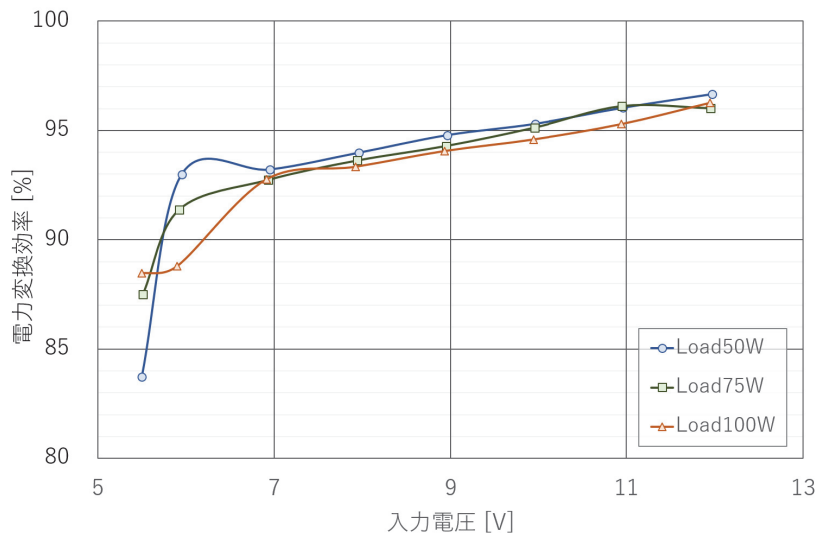


図 3.30 出力制御回路の接続する負荷による電力変換効率

直流安定化電源で電力を供給し、出力に電子負荷を接続して電力の変換効率を測定することにより出力制御回路は評価された。出力制御回路の入出力する電力は、第3章第1節の測定時と同様に端子電圧とシャント抵抗の電圧降下を測定することで算出された。接続する負荷の違いによる変換効率の変化を評価するため、電子負荷を低電力負荷モードで動作させ、接続する負荷が 100 W, 75 W, 50 W の場合において、入力電圧の変化による電力変換効率 η_{pc} の変化を測定した。電力変換効率 η_{pc} は、EDLC からの入力電力 P_{EDLC}

と負荷に供給した電力 P_L から次式により算出された.

$$\eta_{pc} = \frac{P_L}{P_{EDLC}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

図 3.30 にこれら出力制御回路の接続する負荷による電力変換効率の結果を示す. これらの結果から, 電力変換効率 η_{pc} は, いずれの負荷でも概ね 85% 以上であることがわかった. 特に, 入力電圧が 6 V 以上では, 90% 以上の電力変換効率を達成しており, EDLC に蓄電された電力を効率的に利用できると思われる.

3.4.3 実験結果と検討

図 3.31 と図 3.32 にそれぞれ PV モジュールの設置と実験状況を示す，図 3.33 に製作した電力制御回路を示す．開発した大型の木炭 EDLC 蓄電装置は，PV モジュール (オータムテクノロジー，AT-MA200C)4 枚と LED 照明 (アイエール電器，SLD6DDC，48 W) からなり，その装置の動作実験を行った．PV モジュールは，一般的に発電効率が良いとされる南向きの傾斜角度 30° で松江工業高等専門学校内に (島根県松江市西生馬町) 設置された．さらに，動作実験では，LED 照明と同時に情報端末として 22 型の液晶テレビを同時に接続し，製作した電源回路からの電源供給でテレビ放送の受信が可能であるかを実験した．

実証実験は，データロガーを用いて制御回路の入力電圧，EDLC 電圧や出力制御回路の出力電圧を計測しながら負荷となる機器を動作させて行われた．



図 3.31 PV モジュールの設置状況



図 3.32 1 kWh 級電源システムの実験状況

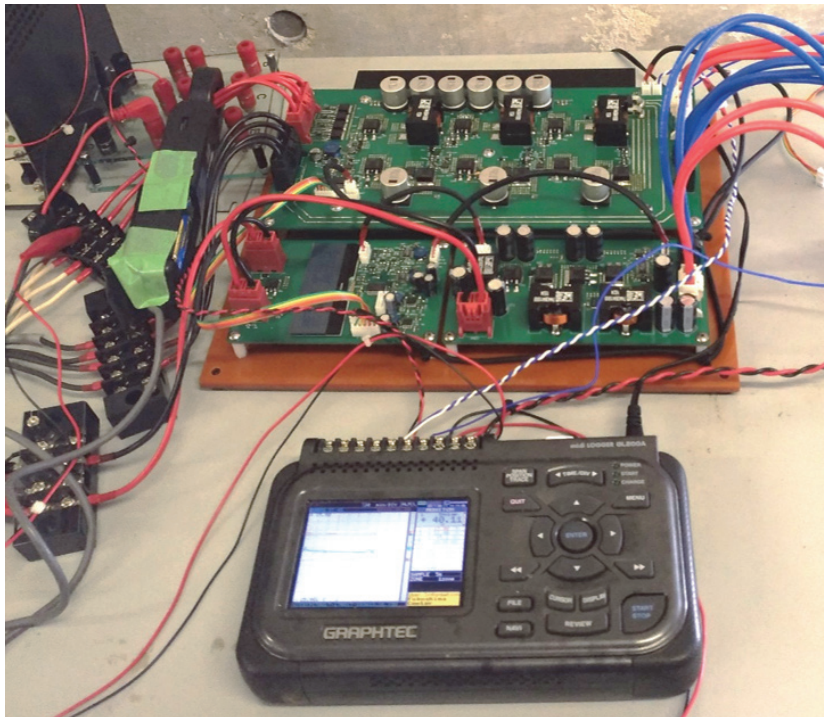


図 3.33 製作した電力制御回路

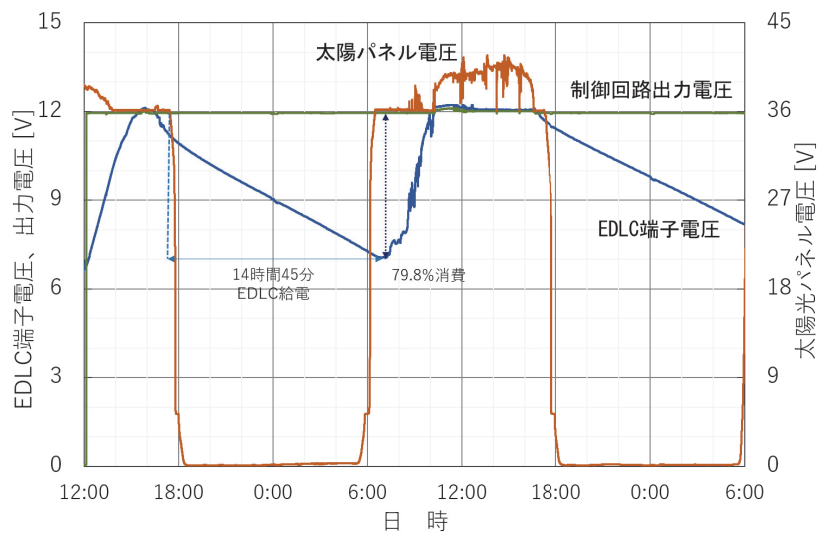


図 3.34 1kWh 級電源システムの動作実験結果

図 3.34 に 1 kWh 級電源システムの動作実験結果 (2017 年 10 月 10 日～12 日) を示す。これらの実証実験の結果から、LED 照明に連続した電力供給が可能であることがわかった。実証実験に使用した負荷は定格消費電力が 48 W であり、木炭 EDLC の端子電圧が低下すると、出力制御回路が発熱し回路が破損する可能性が大きくなるため、木炭 EDLC の放電終止電圧を 5.0 V に設定した。木炭 EDLC の使用範囲を 12 V から 5 V とした場合、1 kWh の蓄電量のうち 82.6% が利用できる電力となる。動作実験では、PV モジュールの発電が停止してから再度充電を開始するまでに、蓄電器の端子電圧が 7 V まで低下していることがわかった。よって、木炭 EDLC に蓄えられている電力のうち利用できる電力量の 79.8% の電力を夜間に消費すると思われる。

また、充電時間については、明け方の日照が少ない時間帯から充電を開始し、夜間に消費した電力を 4 時間程度で満充電にできることがわかった。

さらに、情報端末である液晶テレビは、LED 照明灯と同時に使用した場合であっても、電源システムからの電源供給が可能であり、テレビ放送の受信を確認することができた。

これらの実験結果から、製作した蓄電装置は室内の照明を対象とした蓄電容量としては充分であることがわかった。また、実際の生活環境では、照明を利用する時間帯は夜間の一定時間に限定されるため、他の機器に対しても電力を供給することも可能であると考えられる。

3.5 木炭 EDLC の信頼性向上

3.5.1 EDLC の劣化要因

第3章第2節で記述された屋外照明の実験に関する、EDLC の劣化要因について調査した [11]。同様の劣化現象が発生した EDLC を解体して調査および劣化現象の再現の実験を行った。これらの結果から、①EDLC セルの破損、②電解液の漏れや③陰極の集電極の黒錆もしくは赤錆の存在が観察された。これらは、EDLC セルに過電圧が印加された時に生じる現象である。

EDLC セルへの充電電圧 (印加電圧) を 0.9 V から 0.1 V ずつ上昇させて、電圧印加後 10 分から 40 分経過時の充電電流を測定した。これらの結果を図 3.35 に示す。印加電圧が 1.1 V を超えると充電電流は急増している。1.7 V で 8 時間充電後、充放電特性から静電容量と内部抵抗を測定すると、過電圧印加前に 0.121 Ω であった内部抵抗が 0.172 Ω に増加していることがわかった。静電容量については、充放電波形から大きな変化は観測されていない (蓄電容量としては減少している)。また、解体・調査の結果から、図 3.36 のように陰極集電極の内側が黒色 (黒錆) に変化していることがわかった。

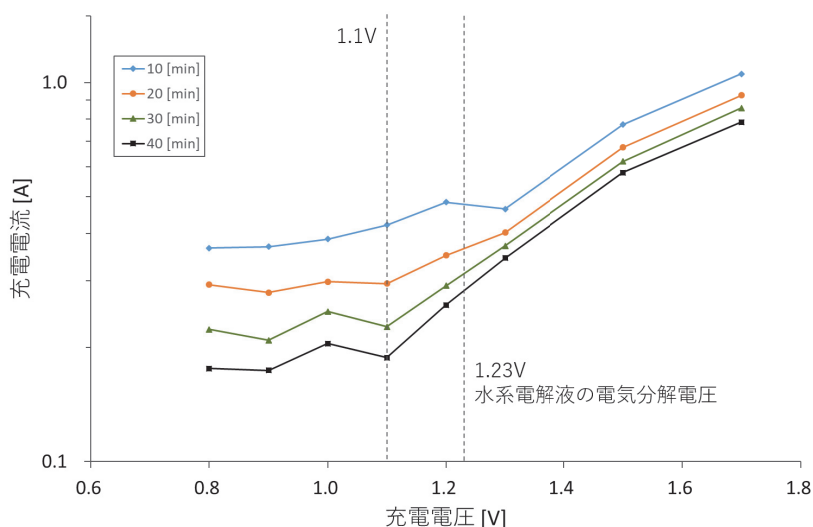


図 3.35 EDLC セルにおける過電圧印加の実験結果 [11]



(a) アノード側・集電極 (b) カソード側・集電極

図 3.36 過電圧印加後の集電極 [11]

これらの結果から、EDLC の劣化現象には、EDLC の直列接続時の分担電圧の不揃い [12] が関係し、EDLC セルへの過電圧の印加による電解液の電気分解が関係することがわかった。また、強アルカリ水溶液中での鉄の腐食現象についても報告されている [13]。KOH 水溶液中に鉄板 (Fe) を電極として挿入し、電圧を印加すると K^+ と OH^- がそれぞれ対向する電極に移動し、電極表面に電気二重層を形成する。ここで、電気分解電圧 (1.23 V) を超える電圧が印加されると、陰極では水素イオン (H^+) が発生すると考えられる。Fe と H^+ では、Fe の方がイオン化傾向 [14] が高いため Fe が電解液中に溶け出し、Fe の腐食が起こる。陽極では O^+ が発生し、 OH^- の存在により Fe の酸化は起こらないと考えられる。これが図 3.36 に示す集電極として利用している鉄板の腐食現象が生じると考えられる。この腐食は EDLC の内部抵抗と蓄電容量の減少に導いた。この電気分解現象は、温度にも依存していることが知られており、今後は EDLC セルにおける電気分解現象の温度特性についても調査する必要がある。

これらの結果から、次のことが木炭 EDLC の劣化要因として考えられる。電気分解によるガス (水素と酸素ガス) の発生により、容器内の圧力が上昇することで①EDLC セル容器の破損が生じた。①EDLC セル容器の破損により、②電解液の漏れが生じた。③陰極の集電極の黒錆もしくは赤錆は、電解液の電気分解現象により発生した。

3.5.2 過電圧保護回路の設計・製作

EDLC の分担電圧 V_n は、次式によって表される。EDLC の直列接続時にそれぞれのセルが有する静電容量のばらつきによって生じ、式 (3.3) を用いて算出される。

$$V_n = \frac{C_0}{C_n} \cdot V_0 \quad (3.3)$$

ここで、 n 、 V_n 、 C_n 、 V_0 、および C_0 は、それぞれセルの番号、セルの端子電圧、セルの静電容量、EDLC 全体の電圧、合成静電容量である。 n 番目の EDLC セルの破損により電解液の漏れが生じた場合、そのセルの C_n が低下し、 V_n が上昇すると考えられる。

前節の EDLC の性能が劣化する対策は、EDLC セルにかかる電圧を電気分解による電流の急増が認められる 1.1 V よりも低くすることが考えられる。具体的には、EDLC ユニット内に保護回路 (PC: Protection circuit, 過電圧防止回路) を設置することがその対策の一つとして考えられる。PC の電源としては、基本的に EDLC セルが充電中に劣化現象が生じるため、EDLC セル自体から電力を得るものとした。このようにすることで、これまで開発した充放電のための制御回路をそのまま利用できると思われる。

図 3.37 と図 3.38 に、それぞれ今回試作した過電圧保護回路のブロック図と基板を示す。PC の動作を以下に示す。

- (1) 回路の動作に必要な電力は、昇圧型 DC/DC コンバータにより 3.3 V の電源を製作して供給した。この電源を用いてマイコン (Microchip, PIC12F1572) と FET を動作させた。
- (2) EDLC 端子間の電圧は、低域通過フィルタ (LPF: Low Pass Filter) を介してマイコンのアナログ入力端子に入力した。入力された電圧から、マイコン内の A/D コンバータ (10 bit) と基準電圧 (1.024 V) を用いて端子電圧値を取得した。
- (3) EDLC 端子間の電圧制御は、適切な放電抵抗 R を P_{i+1} と P_i 端子間に接続し、 P_{i+1} と P_i 端子間の電圧が設定電圧 (1.0 V) 以下を維持するよう、マイコンにより FET を駆動することで電流を放電抵抗 R に流した。なお、FET の駆動は PWM (Pulse Width Modulation) 信号により、放電抵抗 R に流す電流を調整することによって行われた。

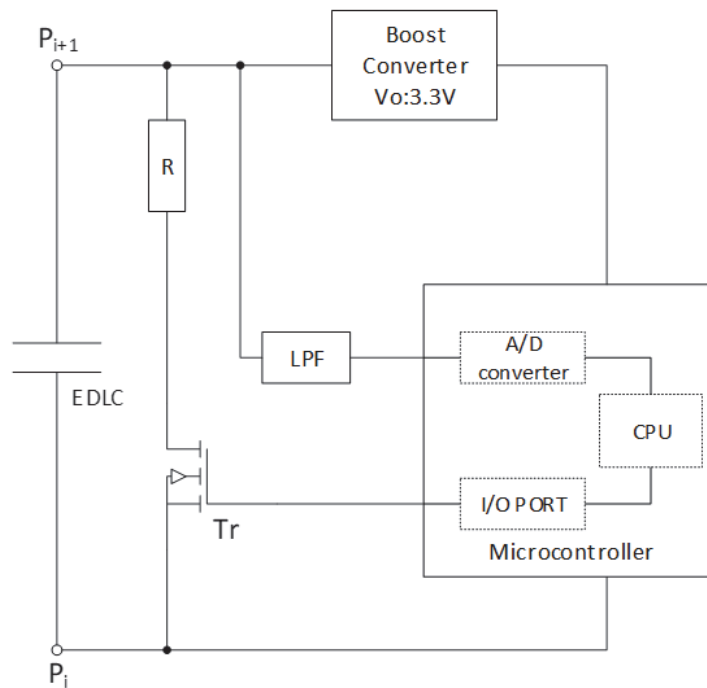


図 3.37 過電圧保護回路のブロック図

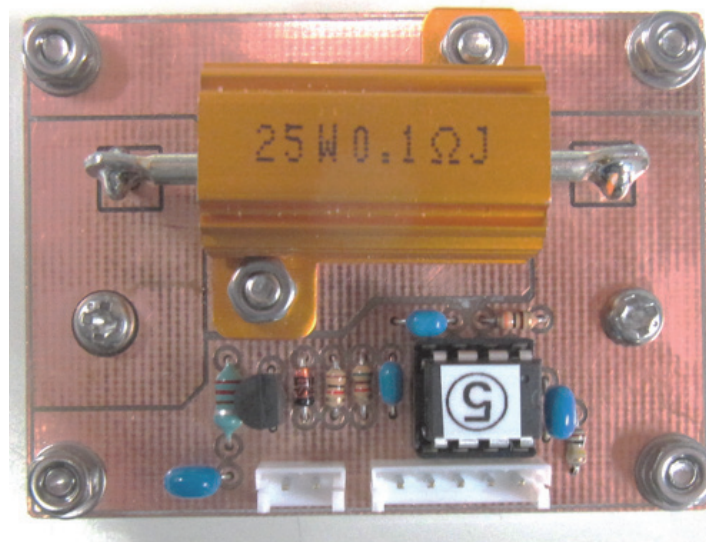


図 3.38 過電圧保護回路基板

接続する EDLC の蓄電容量に対して試作した PC は、十分に消費電力が少ないことが求められる。PC の消費電力測定には、安定化電源 (菊水電子工業, PMC35-1) やデジタルマルチメータ (Tektronix, 2100) を用い、入力電圧を 0.3 V から 1.1 V に可変し、回路電流を計測した。消費電力は、入力電圧と回路電流から算出された。計測結果を図 3.39 に示す。

PC は、EDLC の定格電圧付近において 10 mW の消費電力であった。消費電力が EDLC 定格電圧の 0.1 V の範囲で変化が制御されることは、FET を駆動するために電力が必要であることが考えられる。よって、1 セルあたり 2.3 Wh 程度の蓄電容量に対して 0.4% 程度の消費電力 (10 mW/2.3 Wh) であることがわかった。

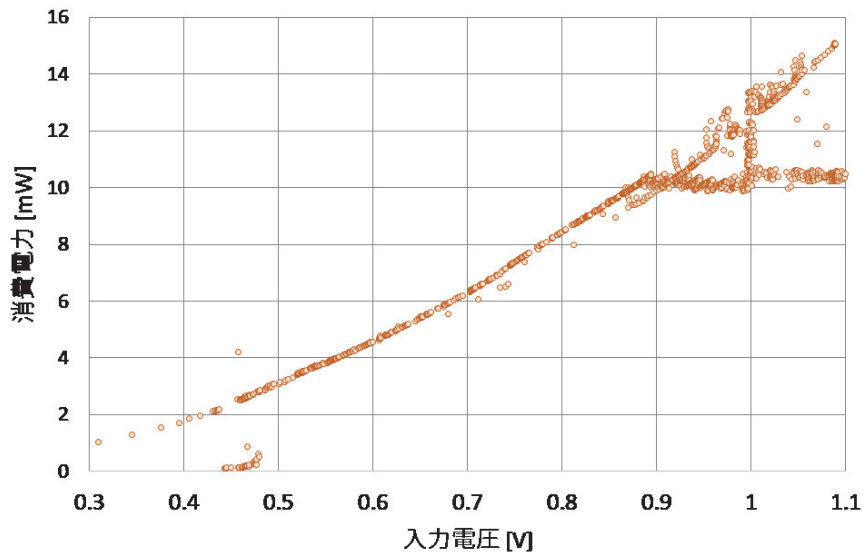


図 3.39 過電圧保護回路の入力電圧に対する消費電力

3.5.3 過電圧保護回路の動作実験結果と検討

PCが目的の動作をすることを確認するとともに、最大充電電流 I_{cm} と PC の放電抵抗 R_{DC} との関係を調べた。EDLC ユニット (箱) は、静電容量が約 25 kF の EDLC セルを 6 個収納している。

4 つの EDLC ユニット (4 箱) を用意して、1 つの EDLC ユニット内のセルを順番に 2 セルずつ並列接続して、4 箱を利用して 12 個の EDLC とした。図 3.40 や図 3.41 に示されるように、それぞれの EDLC (2 セル並列) に PC を付加して直列に接続 (C_1, C_2, \dots, C_{12}) した。充放電は、安定化電源 (松定プレジジョン, KX-1002, 容量 10 A) と電子負荷 (BK-PRECISION, 8540) を定電流負荷として使用した。安定化電源 (充電電圧) を 11.8 V に設定し、8 時間充電/16 時間放電 (定電流負荷 2.0 A) を PIC マイコン (Microchip, PIC12F1822) とリレーを用いた制御器を自作し利用した。各 EDLC の端子電圧はデータロガー (GRAPHTEC, GL220, 20ch, 1 M Ω) により測定・記録された。

PC の R_{DC} を 0.33 Ω 、最大充電電流 I_{cm} を 2.5 A とした場合の実験結果を図 3.42 に示す。EDLC の端子電圧のいくつかは、PC の定格電圧 V_C である 1.0 V を超えないように正確に制限していることがわかる。EDLC セルの静電容量の違いにより、直列接続時の分担電圧が一定とはならず EDLC の端子電圧が 1.0 V に達しないものがいくつかある。これらの結果から、PC の目的である過電圧防止の機能が動作していることがわかる。実験中には EDLC セルの膨らみなどはなく電解液の電気分解は発生していない。

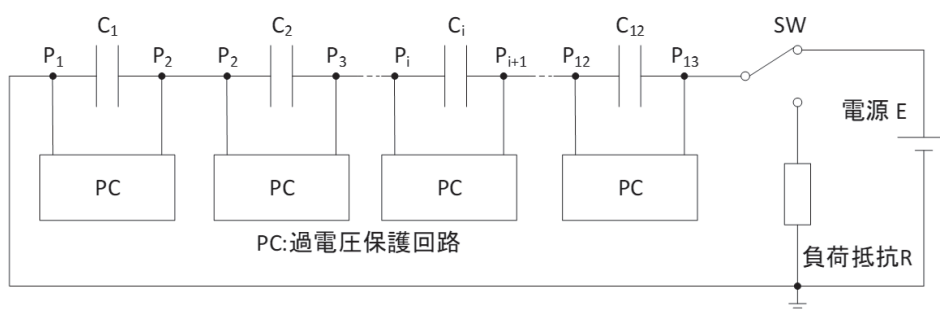


図 3.40 過電圧保護回路の実験回路

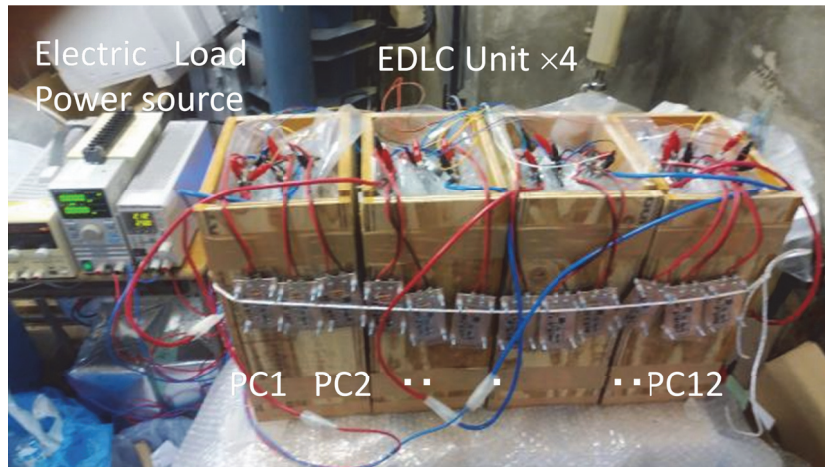


図 3.41 過電圧保護回路の実験状況 [11]

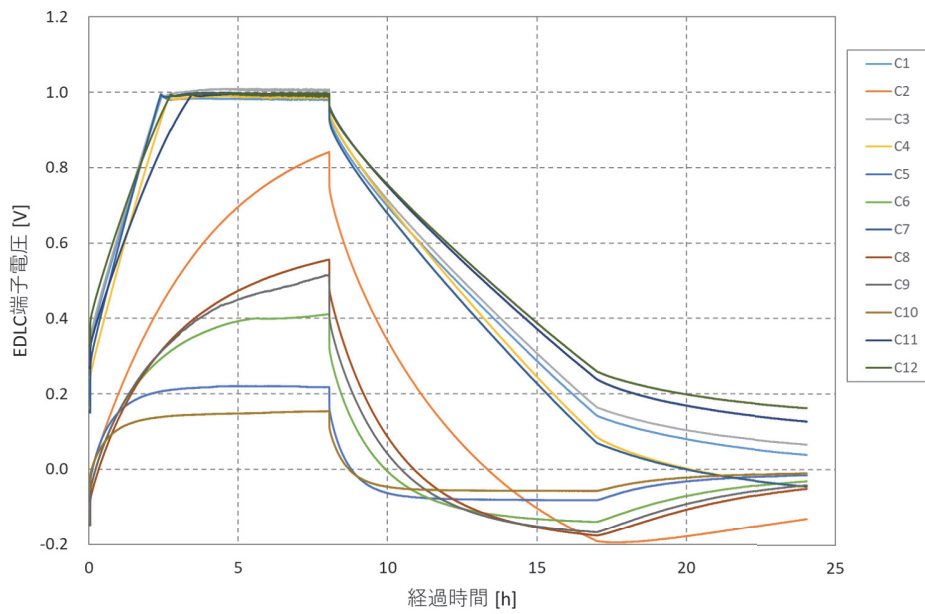


図 3.42 PC の R_{DC} を 0.33Ω , I_{cm} を 2.5 A とした場合の実験結果

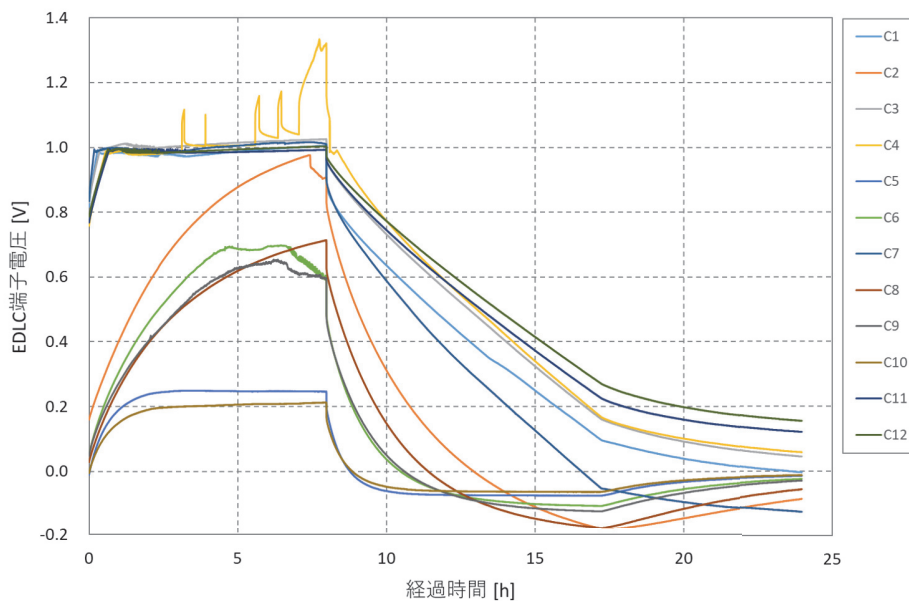


図 3.43 PC の R_{DC} を 0.33Ω , I_{cm} を 3.0 A とした場合の実験結果

次に、PC の R_{DC} と充電電圧は同じとして、最大充電電流 I_{cm} を 3.0 A にした場合の結果を図 3.43 に示す。最初のサイクルで、EDLC の 4 番目の端子電圧が定格電圧の 1.0 V を間欠的に超えていることがわかる。また、2 サイクルでは、3 番目と 4 番目の EDLC 端子電圧が定格電圧の 1.0 V を超え、 1.4 V まで達していることがわかる。この実験中 3 番目と 4 番目の EDLC ではセルの膨らみが観察された。この実験から最大充電電流 I_{cm} を 3.0 A とすると PC は目的の過電圧防止の機能を果たせなかった。この点については、以下の関係があると考えられる。

$$\text{放電抵抗 } R_{DC} \times \text{最大充電電流 } I_{cm} < \text{設定電圧 } V_{set} \quad (3.4)$$

$$0.33\Omega \times 2.5\text{A} (= 0.82\text{V}) < 1.0\text{V} \quad (3.5)$$

$$0.33\Omega \times 3.0\text{A} (= 1.0\text{V}) = 1.0\text{V} \quad (3.6)$$

最初の実験では、最大充電電流 I_{cm} が 2.5 A であったために、放電抵抗 R_{DC} と最大充電電流 I_{cm} の積が 0.82 V と定格電圧 1.0 V よりも低くなっている [式 (3.5) は式 (3.4) を満足]. このため EDLC は充電電流を R_{DC} に流しながらも過電圧を抑制するための自己

放電が可能であると考えられる。しかし、最大充電電流 I_{cm} を 3.0 A とすると式 (3.6)、放電抵抗 R_{DC} と最大充電電流 I_{cm} の積が 1.0 V と定格電圧 V_C の 1.0 V と同じとなるため上述の式 (3.4) の関係を満足しない。このため EDLC の過電圧を抑制するための自己放電が不可能となり、端子電圧が上昇し、最終的に電解液の電気分解が発生したと考えられる。この結果から、PC を使用する場合には最大充電電流 I_{cm} を式 (3.4) の関係を考慮して設定する必要であることがわかった。式 (3.4) の関係を大きな充電電流でも満たすためには PC の R_{DC} は小さい方がよいことになる。実験により PC の R_{DC} を 0.1 Ω まで下げることが可能であることがわかった。

前節から試作した PC は目的の機能を果たしていることがわかった。しかし、直列接続する EDLC の静電容量に大きく違いがある場合には、分担電圧の均一化を図ることは十分にできていない。このことを確認するために次の実験を行った。PC を利用し、分担電圧を揃える方法として、直列接続する EDLC の容量を可能な範囲で揃えることが考えられる。

1 つの EDLC ユニット (箱) を利用して、前節と同様の実験を行った。EDLC ユニットの EDLC セルの数は 6 枚である。この 6 セルを順番に 2 セルずつ並列接続して、3 つの EDLC (C_1 :1-2, C_2 :3-4, C_3 :5-6) を構成し、PC を各 EDLC に接続し、充放電波形を測定した。充放電には、安定化電源 (TEXIO, PA16-313, 0-30 V, 6 A) と抵抗負荷 3 Ω (摺動抵抗器) を利用した。充電電圧は 2.8 V, 最大充電電流 I_{cm} は 1.5 A である。図 3.44 は EDLC セルの静電容量差が大きい時の PC 動作結果を、図 3.45 は EDLC セルの静電容量差が大きい時の配線状況を示している。1 つの EDLC (C_2 :3-4) が十分に充電されていないことがわかる。

次に、同一の EDLC ユニット内の 6 セルを直列に接続し、2.8 V を印加し、分担電圧の大きさを測定して、これに応じてセルの並列の組み合わせを変更した (C_1 :1-5, C_2 :3-4, C_3 :2-6)。先の実験と同様に、充放電波形を測定した。図 3.46 は EDLC セルの静電容量差が少ない時の PC 動作結果を、図 3.47 は EDLC セルの静電容量差が少ない時の配線状況を示している。図 3.46 と図 3.44 の結果を比較すると C_2 の分担電圧が揃っていることがわかる。

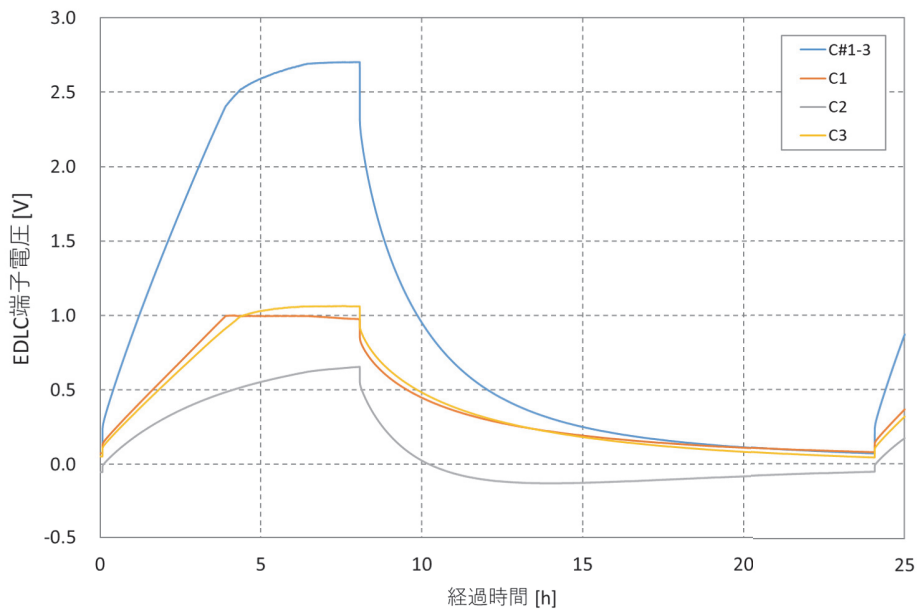


図 3.44 EDLC セルの静電容量差が大きい時の PC 動作結果

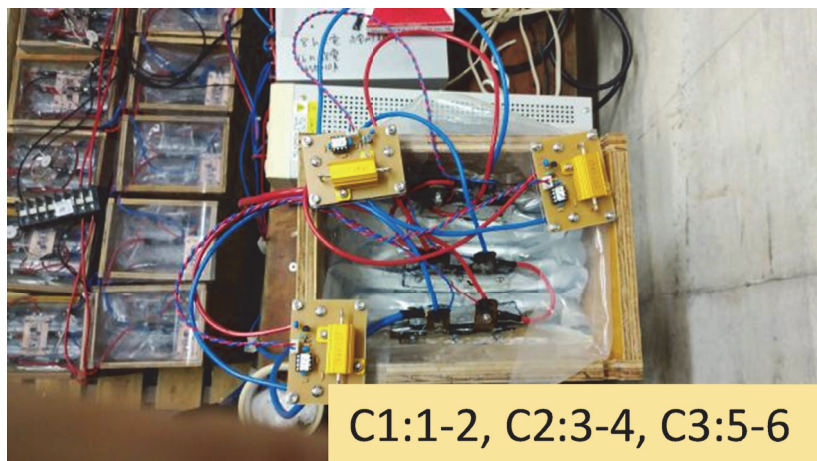


図 3.45 EDLC セルの静電容量差が大きい時の配線状況 [11]

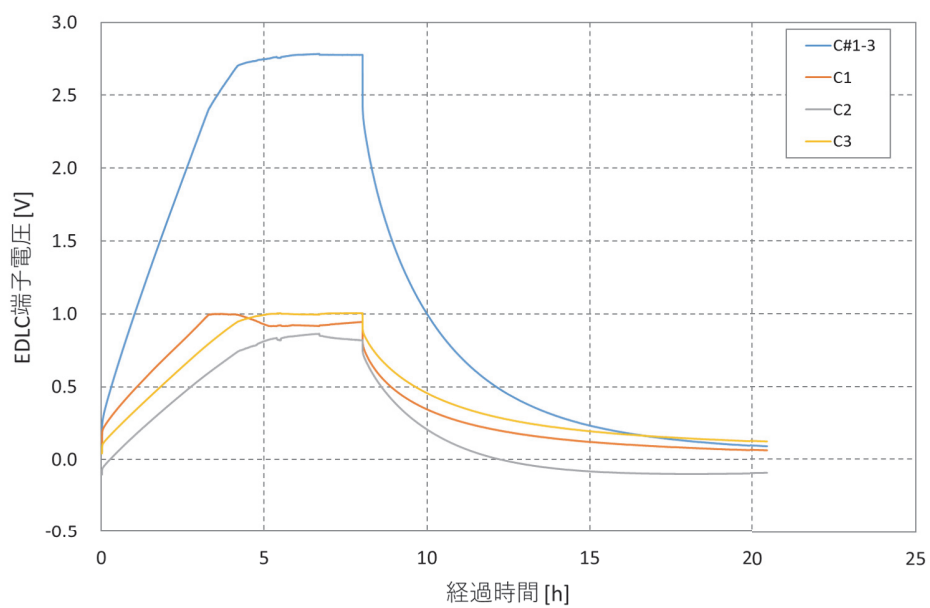


図 3.46 EDLC セルの静電容量差が大きい時の配線状況

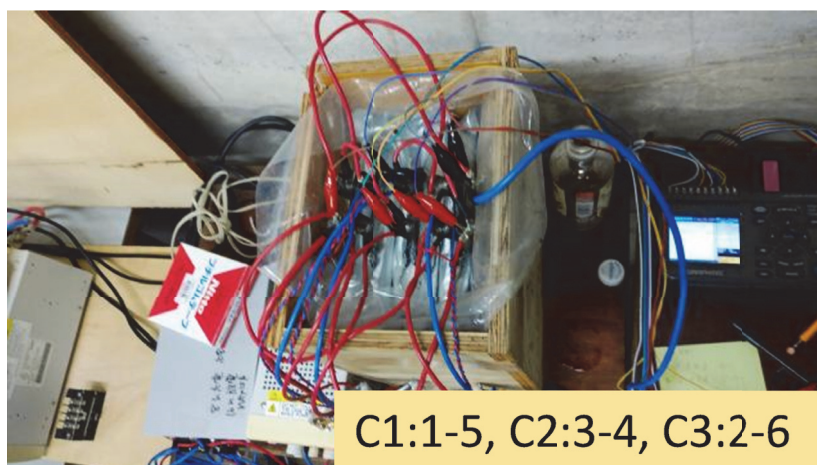


図 3.47 EDLC セルの静電容量差が少ない時の配線状況 [11]

次に、2つの EDLC セルを並列接続し、静電容量を可能な限り揃えた EDLC ユニット (1 ユニットあたり EDLC6 セル) を 4 ユニット直列接続 (EDLC 24 セル, 定格電圧 12 V) した EDLC の分担電圧を測定した。ユニット内の 2 セル並列接続した EDLC には、それぞれに PC を付加した。この EDLC を用いて、各 EDLC セルの静電容量差と PC の付加による過電圧保護の有効性について調査した。

充放電には、安定化電源 (松定プレジジョン, KX-1002, 容量 10 A) と電子負荷 (BK-PRECISION, 8540) を定電流負荷として使用した。各 EDLC セルの静電容量差は、充電電圧を 6.0 V (PC が動作しない), 最大充電電流を 3 A, 8 時間充電/16 時間放電 (定電流負荷 2.0 A) に設定して測定された。各 EDLC の端子電圧はデータロガー (GRAPHTEC, GL220, 20ch, 1 M Ω) により測定・記録された。PC を動作させる場合には、充電電圧を 12.0 V に設定した。

EDLC セルの静電容量差は、放電直前において EDLC セルの端子電圧の平均値とそれぞれの差の割合により確認された。PC の付加による過電圧保護の有効性については、その割合のばらつきの変化を調べた。

図 3.48 に PC 不動作時の各 EDLC 端子電圧を、図 3.49 に PC 不動作時における放電直前での EDLC セル端子電圧のばらつきを示す。図 3.50 に PC 動作時の各 EDLC 端子電圧を、図 3.51 に PC 動作時における放電直前での EDLC セル端子電圧のばらつきを示す。

実験の結果、EDLC を 4 ユニット組み合わせた時、PC が動作していない場合には、各セルの静電容量が $\pm 3\%$ の範囲にあることがわかった。PC が動作した時、各 EDLC セルの端子電圧は、PC が動作していない時と比較してばらつきが減少しており、PC による過電圧保護の機能を果たしていることが確認された。

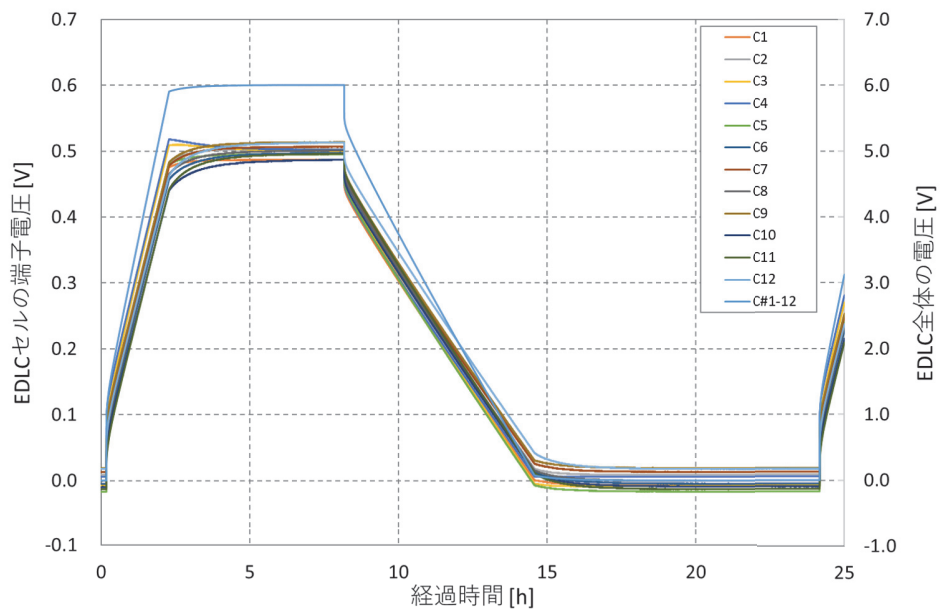


図 3.48 PC 不動作時の各 EDLC 端子電圧

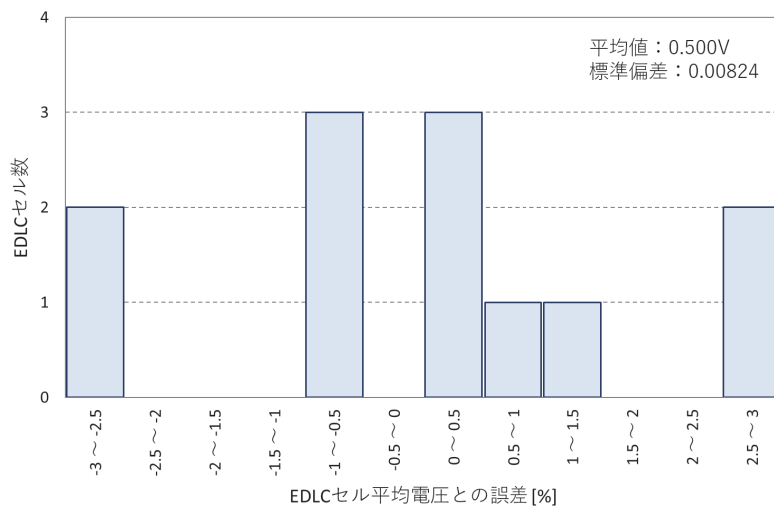


図 3.49 PC 不動作時における放電直前の各 EDLC 端子電圧のばらつき

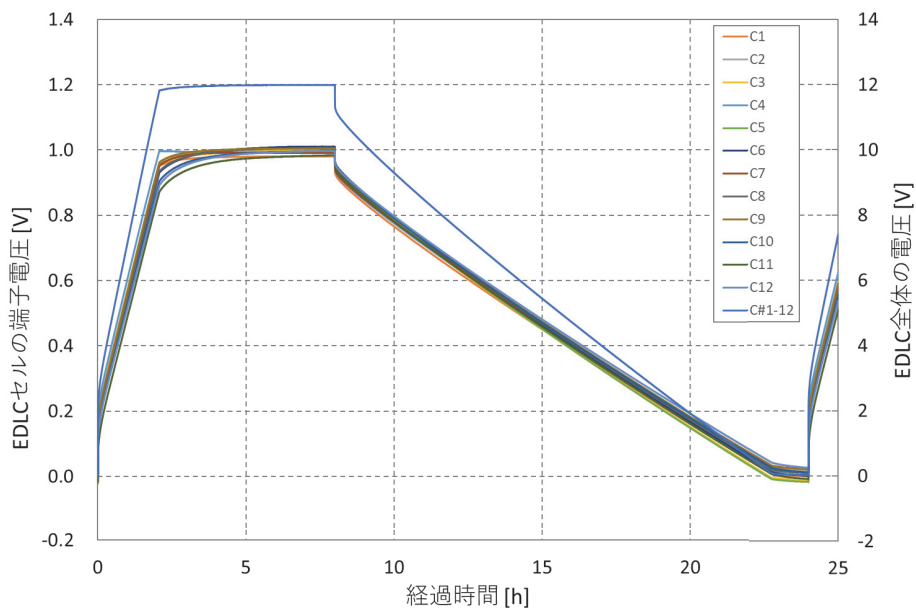


図 3.50 PC 動作時の各 EDLC 端子電圧

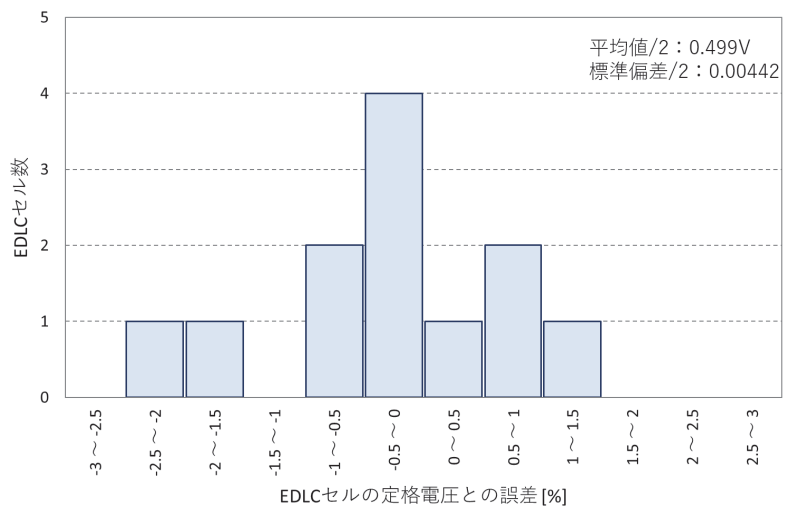


図 3.51 PC 動作時における放電直前の各 EDLC 端子電圧のばらつき

次に、第3章第2節で実験に用いた屋外照明装置にPCを取り付けたEDLCを蓄電器として実証実験を行った。先に示した、式(3.4)の関係を満足するように屋外照明装置の充電制御回路は最大充電電流 I_{cm} を20 Aに設定しており、充電完了時にはPCで消費される電力が大きくなるため、最大充電電流 I_{cm} をEDLCの端子電圧が10 V以上で5A、11 V以上で3 Aとなるよう制御方法を変更した。

EDLCの接続方法は、これまでの実験から1ユニット内で静電容量の差が少なくなる組み合わせで2セルずつ並列接続し、それぞれのEDLC(2セル並列)を直接接続(定格電圧3 V)した後、それぞれのEDLCユニットを4個直列接続することで定格電圧12 VのEDLCとした。

実験は、PVモジュール(JA SOLAR, AT-MA50A)で得られた電力でEDLCを充電し、LED照明(JRS株式会社, BH-DC12V-27LW)を負荷とした。LED照明の点灯時間は、第3章第2節で行った実験と同様の設定とした。各EDLCユニットの端子電圧はデータロガー(GRAPHTEC, GL200A, 10ch, 1 M Ω)により測定・記録された。また、電力制御回路の動作確認のため、制御回路の入出力電圧も同時に測定・記録された。

2019年12月9日(晴)に測定された屋外照明灯内のEDLCユニット端子電圧を図3.52に示す。最も端子電圧が大きかったEDLCユニットは、3.03 Vと定格電圧である3.0 Vに対して30 mV以下で電圧が制限されていることが確認された。また、図3.53に屋外照明灯内の制御回路の入出力電圧を示す。屋外照明灯では、日照時の急速充電と夜間に10時間のLED照明灯点灯が確認された。

これらの結果から、PCが屋外照明装置においても正常に動作することがわかった。このPCにより、EDLCの劣化防止が実現できたかどうかについては、この実証実験を継続する必要がある。

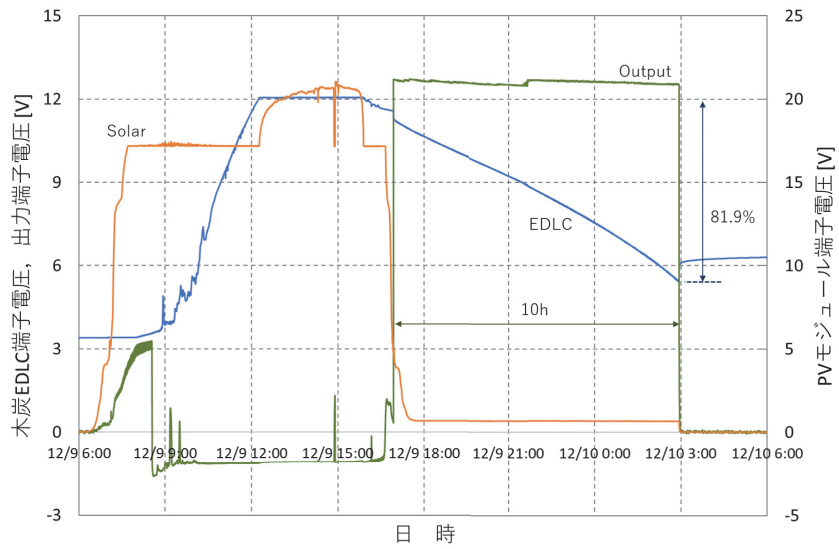


図 3.52 屋外照明灯内の EDLC ユニット端子電圧

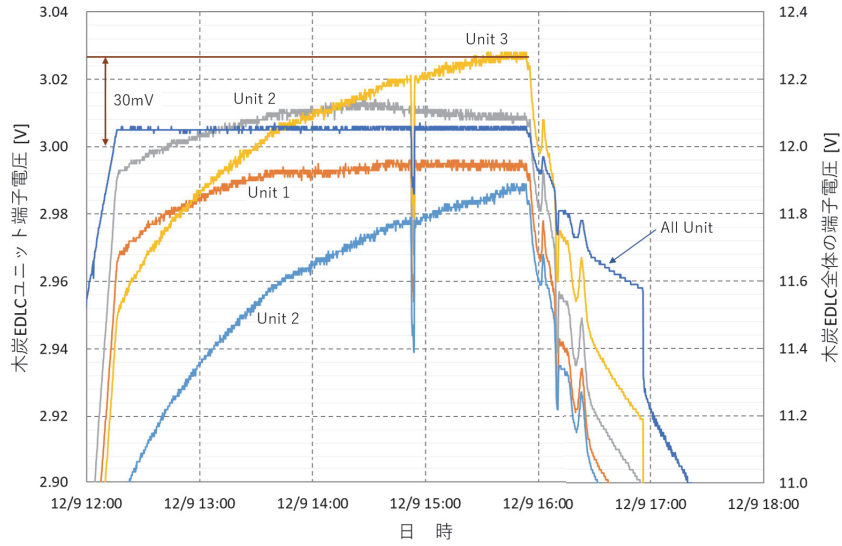


図 3.53 屋外照明灯内の制御回路の入出力電圧

3.6 結言

独自に開発した木炭 EDLC は、自然の植物を原料とした活性炭を電極材料に使用しており、低環境負荷の構造となっている。また、電解液に用いた KOH 水溶液は水分の混入に強く、不燃性であるため安全性が高い。これらの特徴を有する木炭 EDLC が蓄電器としての有効性を確認するため、PV モジュールを電源とする屋外 LED 照明灯を製作し、数年間に渡る実証実験を実施した。

PV モジュールと木炭 EDLC、専用の制御回路を組み合わせた電源システムを設計・開発し、夜間に LED 照明を点灯させて実証実験を行った。設置当初は、LED 照明を 10 時間点灯することが可能であった。また、2 年 4 ヶ月経過後には 7 時間程度の点灯時間を確認した。

以上のことから、屋外 LED 照明灯程度の消費電力を有する機器に対して、木炭 EDLC を蓄電装置として利用することは、低環境負荷、安全性やメンテナンス性の観点から有効であると考えられる。

次に、屋外 LED 照明灯に向けて開発した電源システムの技術を基本として、オフグリッドの Wi-Fi 用電源システムを開発し、その実証実験を行った。

開発した蓄電装置を使用して、屋外で使用する小電力 (8.4 W) の情報機器を対象とした電源としての有効性を確認するため、連続動作実験を実施した。また、EDLC の定格電圧による電源システムの駆動時間に与える影響を調査した。これらの結果、200 Wh の蓄電容量を有する木炭 EDLC を用いて、屋外での Wi-Fi システムを 24 時間連続稼働できることがわかった。また、木炭 EDLC の定格電圧は、高く設定した方が蓄電されているエネルギーの利用率が高く、同容量の木炭 EDLC よりも機器を安定して稼働できることも明らかになった。木炭 EDLC を蓄電器とする電源システムの一例として、オフグリッドにおける情報通信機器のための電源システムや非常時でのバックアップ電源としての利用も考えられる。また、蓄電容量の向上や、より大きな機器の駆動にも耐えうる電源システムの開発が今後の課題と考えている。

さらに、木炭 EDLC を用い、家庭用の照明器具をオフグリッドで駆動するための電源システムの開発を行った。開発した電源システムは、1 kWh 程度の木炭 EDLC と定格出力 800 W の PV モジュールを用いてシステムを構成し、充放電には 100 W 以下の負荷 (家電) を想定して新たに制御回路を製作した。

充電制御回路は、3 系統の降圧型 DC/DC コンバータを並列に接続して使用し、充電時の電流を構成するデバイスに分散して流すことにより、効率的な木炭 EDLC の充電を

実現した。また、木炭 EDLC の出力電圧を安定させる出力制御回路は、2 系統の昇圧型 DC/DC コンバータを並列に接続して使用することで、電力変換効率の向上を実現した。これらの制御回路は、複数で構成される DC/DC コンバータを駆動する信号の位相をずらし、回路中に急峻な電流の流れを抑えることでデバイスの小型化を図っている。

実証実験では、家庭用の屋内照明器具を想定した 48 W の LED 照明を開発した電源システムで連続点灯する実験を行い、オフグリッドの電源システムの連続点灯を確認した。

さらに、低環境負荷型独立電源システムを設計・製作して実証実験を行なった。これらの結果から、より高出力でしかもメンテナンス・フリーの電源システムを目標としてきた。高出力の電源システムに関しては 1 kWh を達成したが、67.1 Wh の照明装置の電源システムでは 2 年 4 カ月で照明点灯時間が 10 時間から 7 時間に減少した。この実証実験の結果に基づいて、電源システムの蓄電部の解体を行い、原因を究明したところ、蓄電部における木炭 EDLC の特性のばらつきによって蓄電部の劣化が生じることがわかった。このため、照明点灯時間が初期と変わらないようにするために過電圧保護回路の設計・製作を行なった。これらの保護回路を用いた実験結果は充電段階で過電圧が抑制され、より長い時間のメンテナンス・フリーの低環境負荷型独立電源システムとなることが期待される。

参考文献

- [1] 宮入 寛太郎, 遠藤 喜久子, 松田 俊介, 國領 二郎, “街路照明を対象とした LED 化の方法と効果”, 照明学会誌, 第 97 卷, 第 2 号, pp.57-64(2013).
- [2] 瀬戸本 龍海, 内田 裕士, 田口 常正, “白色 LED 光源を用いた省エネルギー型太陽電池式街灯の開発と照度特性の評価”, 照明学会誌, 第 85 卷, 第 8 号, pp.577-584(2001).
- [3] パナソニック株式会社, リチウムイオンソーラー街路灯, https://www2.panasonic.biz/ls/lighting/outdoor/street_light/solar/lithium_ion/, (2019/12/8).
- [4] 東芝ライテック株式会社, LED ソーラーライト, https://www.tlt.co.jp/tlt/products/facility/facility_led_outdoor/led_solar_light/led_solar_light.htm#line, (2019/12/8).
- [5] 岡村 廸夫 著: “電気二重層キャパシタと蓄電システム”, 日刊工業新聞社, (2005).
- [6] 福間 眞澄, 内田 孝幸, 福島 志斗, 小川 仁一, 吉野 勝美, “綿布を材料にした EDLC 電極”, 電気学会論文誌 A, 第 134 卷, 第 5 号, pp.360-361(2014).
- [7] 福間 眞澄, 内田 孝幸, 福島 志斗, 小川 仁一, 吉野 勝美: “木炭 EDLC の試作とそれを利用した屋外 LED 照明”, 電気学会論文誌 A, 第 135 卷, 第 9 号, pp.555-556(2015).
- [8] 塚田 晃司, “中山間地域の災害時孤立集落を想定した情報通信システム開発の試み”, 計測と制御, 第 53 卷, 第 6 号 pp.494-498(2014).
- [9] ニチコン株式会社, 単機能蓄電システム, <https://www.nichicon.co.jp/products/g3/>, (2019/12/8).
- [10] シャープ株式会社, クラウド蓄電池システム, https://jp.sharp/e_solution/battery/lineup/, (2019/12/8).
- [11] 福間 眞澄, 福島 志斗, 飯塚 育生, 高橋 信雄, 吉野 勝美, “木炭蓄電器に用いる過電圧防止回路”, 電気材料技術雑誌, 第 28 卷, 第 1 号, pp.26-84(2019).

- [12] 福間 眞澄, 福島 志斗, 吾郷 匠実, 有田 聖矢, 今岡 洋人, 吉野 勝美, “木炭を利用した水系電解液 E D L C の分担電圧”, 平成 30 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.84(2018).
- [13] 太田 健一, “濃厚アルカリ水溶液中での鉄の腐食”, Boushoku Gijyutu, Vol.33, pp.297-298(1984).
- [14] 林 昌彦, 川島 由香 著: “活性炭ハンドブック”, 丸善, (2011).

第 4 章

木炭 EDLC の WSN システムへの 応用

4.1 序言

第 2 章において試作した電源装置は、木炭 EDLC を用いた汎用的な WSN システム想定したオフグリッド型の電源装置であった [1]。この章では、オフグリッド型の WSN システム応用として農業分野を対象とし、遠隔でモニタリングするシステムの実証実験を行った。農業分野では、既に稲作の育成環境を管理することを目的として、複数のセンサを搭載した WSN システムの開発が行われ、製品として活用されつつある [2, 3]。農業での WSN システムは、管理対象となるフィールドがデータを集約するゲートウェイから見通し範囲外の可能性があるため、通信を中継する必要がある [4, 5]。さらに、農業等を行う場所では、自然環境を汚染する可能性を低くし、屋内とは異なる環境におけるシステムの動作が求められる [6]。

本章では、WSN システムとオフグリッド型電源装置を用いて、稲作において水を管理する際に必要となる水田の取水口にある注水バルブの開閉状態を遠隔でモニタリングするシステムを試作し、WSN システムの実証実験結果を記述する。また、取水口にある注水バルブの状態を水位の変化により判定するため、静電容量の変化を利用した水位センサと、超音波による水位センサの試作し、これら実験結果についても記述する。

実験を行ったフィールドは、管理を必要とする水田が複数枚あり、その距離は数百 m から数 km の範囲にある。よって、実証実験では、広範囲での通信を確保する必要があるため、920 MHz 帯の LPWA(Low Power Wide Area) 通信モジュールを用いて構成し、通信の中継機能を有するシステムとした。WSN システムの中継器に用いた電源装置は、

WSN システムを構成する通信モジュールの中でも中継器の消費電力が大きく、故障等の際にも水田の汚染を少なくし、独立した電源の確保を目的として、PV モジュールと木炭 EDLC を用いた電源装置を設計・製作した。

4.2 WSN システムの構成

図 4.1 に実証実験に使用した WSN システムの構成を示す。WSN システムは、センサ等からの情報を送信するセンサノード、センサノードと中継の役割を同時に果たす中継器、センサノードと中継器からのデータを集約するゲートウェイからなる。WSN システムのセンサノードは、通信モジュール (インタープラン株式会社, IM920) を使用し、GPS モジュール (太陽誘電株式会社, GYSFDMAXB) から位置情報と時刻を取得し、開発した水位センサから水位情報をゲートウェイにデータ転送するセンサノードを試作した。中継器は、センサノードを常に起動した状態にしており、他のセンサノードから送られてきたデータがあるときにのみに中継機能を果たす。ゲートウェイは、シングルボードコンピュータ (アールエスコンポーネンツ株式会社, raspberry pi 3) と通信モジュールからなり、電源は商用電源を用いた。

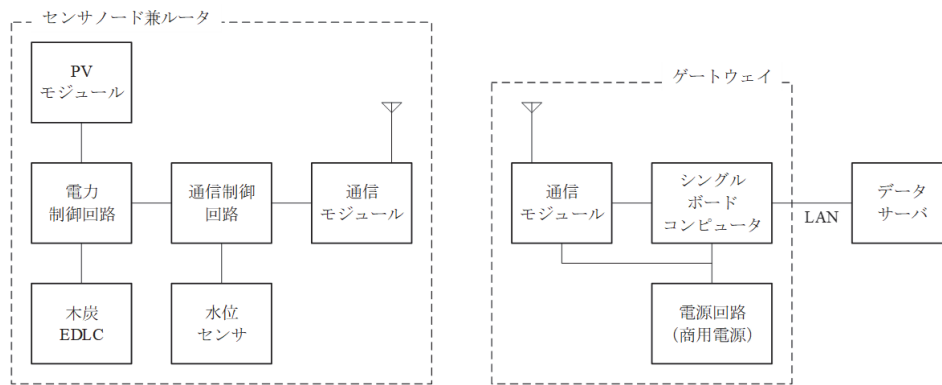


図 4.1 WSN システムの構成

図 4.2 に木炭 EDLC による電源システムの構成を、図 4.3 に製作した電源制御回路基板を示す。電源の出力制御は、昇圧回路により蓄電デバイスの定格電圧より高い電圧に昇圧し、その後接続する端末の駆動電圧まで降圧することにより安定化した。また、蓄電デバイスに木炭 EDLC(約 15 Wh) を使用した際の出力制御は、木炭 EDLC の端子電圧が 1.25 V 以上の時に動作するよう設定された。

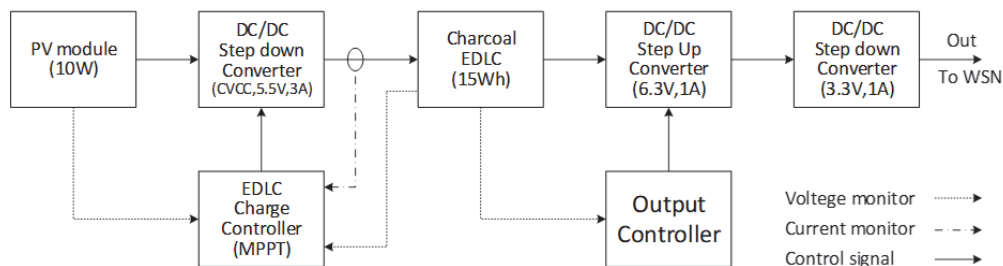


図 4.2 木炭 EDLC による電源システムの構成

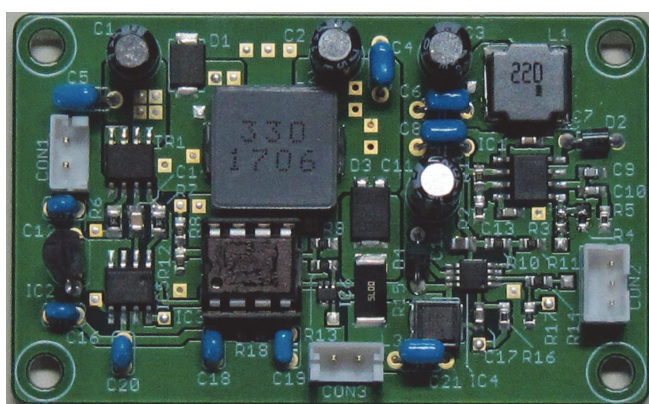


図 4.3 試作した電源制御回路基板

4.3 超音波型水位センサの開発

水田において稲作をする場合、水の管理に労力を必要とするため、超音波による水位センサを試作した。水田を管理する際、人為的なミスにより取水口バルブを閉め忘れることがあり、取水口内の水位を計測することにより取水口の状態を推定し、監視することを目的とした。

図 4.4 に水田にある取水口の一例を示す。水田に使用されている取水口は、機械的なバルブを用いてパイプラインから得る水の排出量を調整する型式や、自然の水路から木製の板や土嚢を用いて水の流れを分流させる形式等の様々な手法が用いられている。この研究で対象とする取水口は、機械的なバルブを用いてパイプラインから水を取り入れ、コンクリート等で作られた一時的に水を貯える升を介して水田に注水する型式を監視対象とした。



図 4.4 水田の取水口

図 4.5 に水位センサの分類について図示する．一般的に水位の計測に用いられるセンサには，機械的な可動部を有するフロート式，サウンジング式やパドル式などがあり，可動部を持たない電極式，静電容量式や圧力式などがある．さらに，非接触で測定可能な方式として，超音波式，電波式やレーザー式などの測定方法もある [7]．

2 種類の水位センサを試作し，実際の水田における水位センサとして利用可能であるか実証実験を行った．水田の取水口で使用するセンサは，周囲に雑草が自生していることや水生生物等の影響により水位の計測を阻害する恐れがある．水田において取水口から注水は，栽培されている農作物の種類によるが，この研究で対象とする稲においては，4～5 か月程度の期間で土壌の水分調整を必要とする．その間，水道水等や工場で利用される水と比較してゴミ等が多く屋外での使用にも耐えうる必要があるため，機械的な可動部を無くすことでメンテナンスの回数を抑える方式を選定し，可動部が無く接触式の水位センサとして，水が有する高い誘電率を利用した静電容量型水位センサを試作した [8,9]．



図 4.5 水位センサの分類

図 4.6 に静電容量方式による水位センサの原理を示す。電極を対向した電極間には静電容量があり、電極の間隔と形状が一定である場合、その容量は電極間にある材料の比誘電率に比例する。試作したセンサでは、電極間に水が接触していない場合には空気と基材の複合的な誘電率となる。また、水が接触している場合には、水と基材の複合的な誘電率となる。空気と水の比誘電率 ϵ_r は、それぞれ約 1 と約 80 である。よって、試作した水位センサの電極に水が接触している場合、電極間の静電容量が増加する。

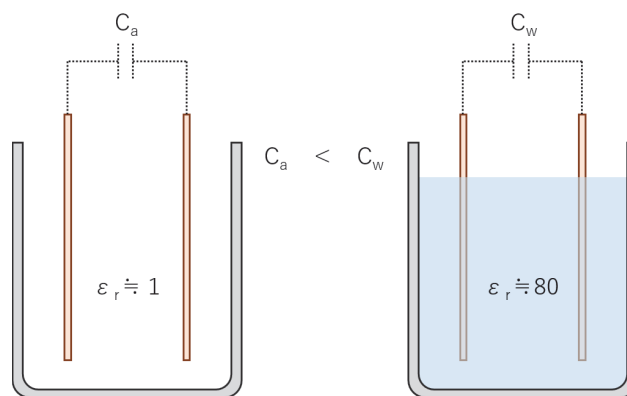


図 4.6 水による静電容量への影響

PIC マイコン (Microchip Technology Inc., PIC18F26K22) に内蔵されている充電時間測定ユニット (CTMU : Charge Time Measurement Unit) の機能を用い, 水の接触による静電容量変化は, 電極間の微小な静電容量を測定することで段階的に計測された [10]. 電極間の静電容量は, マイコン端子に接続された電極間の静電容量を定電流源により一定時間充電され, 充電後の電圧を A/D コンバータにより数値化することで, 指定した端子に接続されている静電容量を推定することが可能になる.

図 4.7 に試作した水位センサの構成を示す. この水位センサでは, プリント基板 (基材: FR4) 上に作製した複数本の電極間にある静電容量を測定することで, 各電極間における水の有無を段階的に判定した. プリント基板上の配線では, マイコンが内蔵する A/D コンバータの低圧側基準電位となる端子につながる電極をセンサ部の片側に配置し, 対向する位置に A/D コンバータの入力となる複数の端子につながる電極を配置した. センサの水と接触する部分は, 電極を 20 mm 間隔で 11 本配置し, 200 mm の範囲を段階的に測定可能な構造とした. センサで得られる数値は, マイコンと接続した D/A コンバータ (Microchip Technology Inc., MCP4821) を用いて段階的なアナログ電圧により出力した.

図 4.8 に試作した静電容量型水位センサを示す. プリント基板上に配置した電極は, 農薬や肥料, 水分などが付着することが多いため電極の腐食と, 測定対象となる水の電気伝導による影響を防ぐため, プリント基板表面をソルダレジスト塗料でコーティングし, さらにその上から防湿塗料でコーティングを施した.

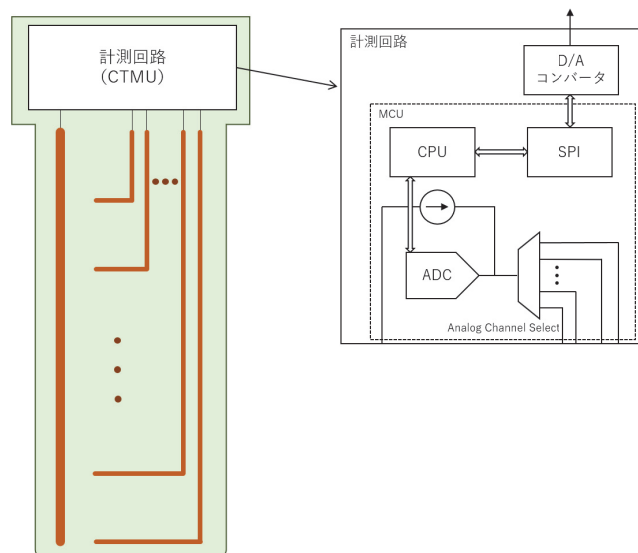


図 4.7 試作した静電容量型水位センサの構成



図 4.8 静電容量型の水位センサ

図 4.9 に超音波を用いた水位センサのブロック図を示す。製作した超音波を用いて非接触で水位を計測するセンサは、発信用と受信用の超音波センサ (SPL (Hong Kong) Limited, UT1007-Z325R) を電子回路基板の同一の平面上に配置された。超音波が水面で反射して往復する時間をマイコン (Microchip Technology Inc., PIC16F1825) により計測することで水面までの距離を算出した [11]。

図 4.10 に試作した超音波型水位センサを示す。試作した水位センサは、一般的な超音波式のセンサとは異なり、超音波の伝搬経路を塩化ビニール管 (内径 65 mm) で覆い、取水口付近にある草やゴミなどによる影響を受けにくい構造とした。水位センサの取り付けは、既にある取水口を加工することなく設置可能な構造と大きさにし、簡易的な設置が可能となっている。

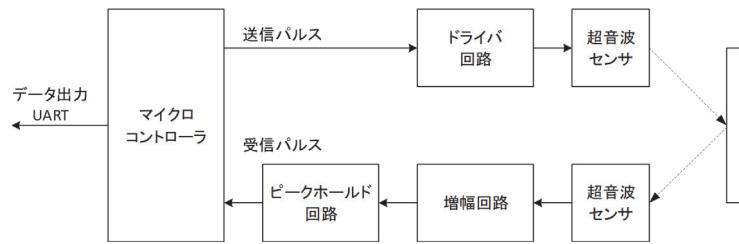


図 4.9 超音波水位センサのブロック図

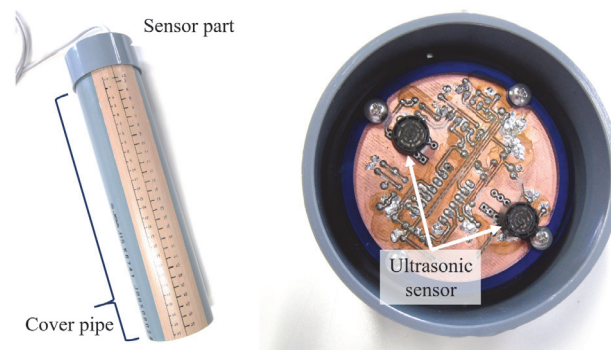


図 4.10 超音波水位センサ

図 4.11 に超音波センサの配置が不適切な場合，図 4.12 に配置が適切な場合の送信信号と受信した信号を示す．超音波センサの周囲を覆った場合，超音波センサ付近に複数の反射経路が存在し，発信直後に受信用超音波センサに到達する不要な信号が増加する．その対策として，発信直後に受信用超音波センサへ到達する信号が減少するように超音波センサを一定の間隔に配置した．

反射波の測定は，マイコンの内部の 16 bit タイマーと割り込み機能を用いて計測され，タイマーのカウントはマイコンのシステムクロックを分周して入力するように設定された．空気中における音波の伝播速度 v_s は次式で表される．

$$v_s = 331.45 + 0.61 \cdot T \quad (4.1)$$

タイマーの動作クロックを 2 MHz に設定したので，測定値の分解能は，気温が 20 °C の際に 1 mm となるよう設定された．ただし，正確に安定した測定のためには，音波の伝播速度 v_s は温度 T の影響により変化するため，温度補正を行う必要がある [12]．

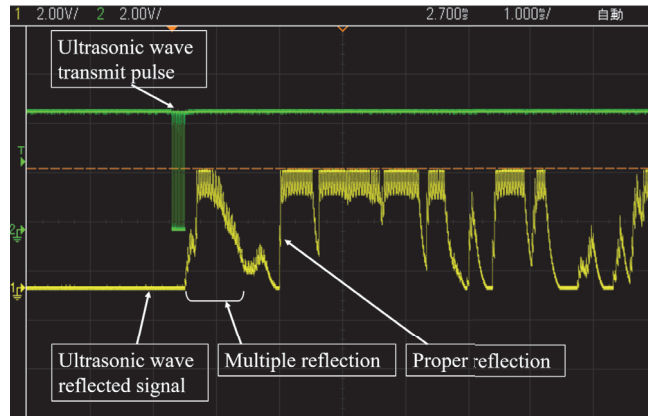


図 4.11 超音波センサの配置が不適切な場合の送受信信号

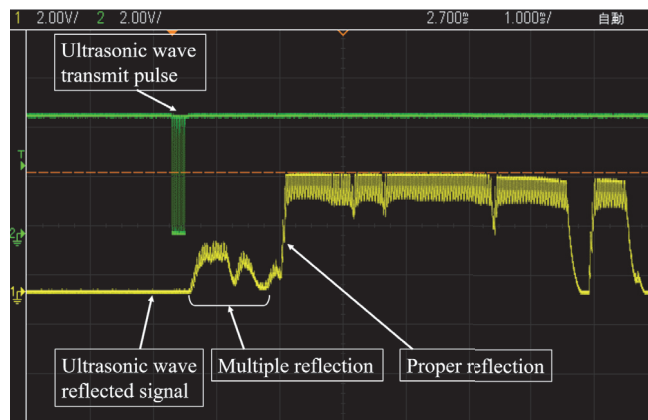


図 4.12 超音波センサの配置が適切な場合の送受信信号

4.4 開発したシステムの動作実験結果と検討

設計・製作した WSN システム用の電源装置は、PV モジュールを用いて蓄電デバイスを十分に充電ができるか調べるために、直流電源と木炭 EDLC を用いて電力変換効率の測定を行った。測定では、直流電源の電圧設定と電流の上限をそれぞれ 19.0 V と 0.70 A に設定し、充電回路の入力と出力の電圧をデータロガー (GRAPHTEC, GL100 + GS-4VT) に接続した。入力電力は、想定する PV モジュールの最大出力動作電圧が 17.8 V であるため、直流電源の電流制限機能が動作している際には、約 12.5 W となる。また、充電回路に流れる電流は、5 mΩ のシャント抵抗を接続し、シャント抵抗の両端をデータロガーに接続して計測された。

図 4.13 に電力変換効率の測定結果を示す。これらの結果から、12.5 W 程度の出力電力で木炭 EDLC を十分に充電可能であり、想定する入力電力により 3 時間程度で充電が完了することがわかった。

図 4.14 に水田における設置状況と WSN システムを、図 4.15 に動作実験の結果 (2018 年 5 月 13 日～2018 年 5 月 15 日) を示す。試作した WSN システムと電源装置を本校の近郊にある水田に設置し、屋外で実証実験を行った。実験での記録するデータは、PV モジュールと木炭 EDLC の端子電圧および、出力制御回路の出力電圧をデータロガー (株式会社ティアンドデイ, MCR-4V) により記録した。

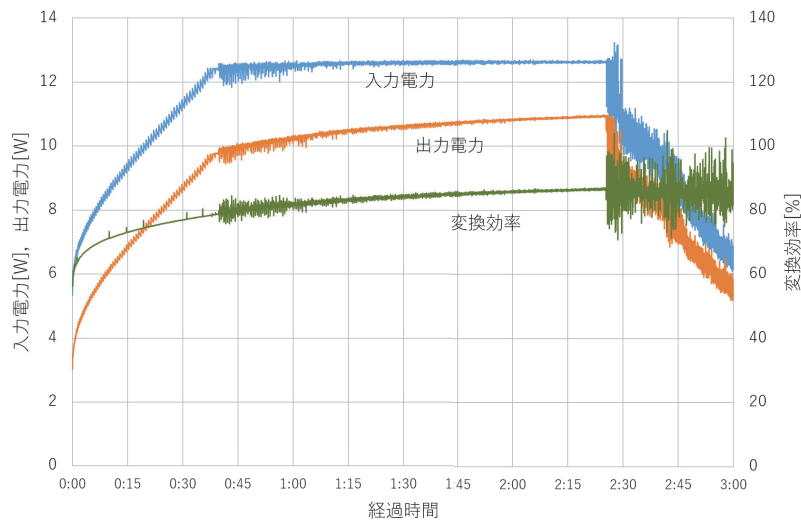


図 4.13 充電制御回路の充電効率測定結果

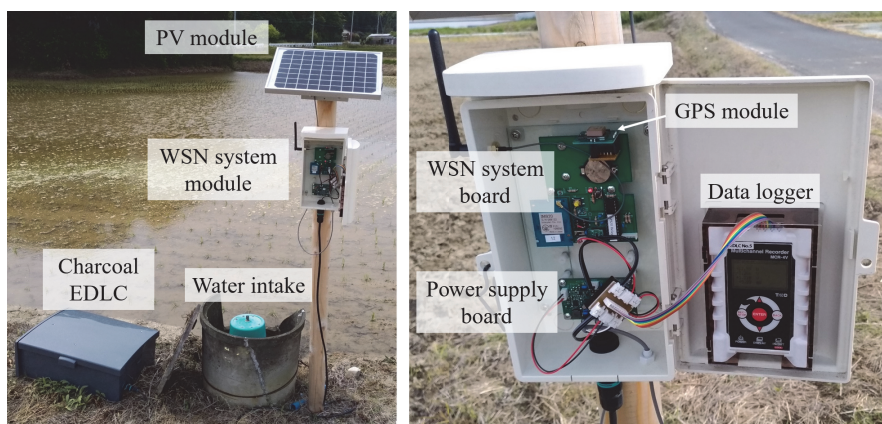


図 4.14 WSN システムノードの設置状況と中継端末

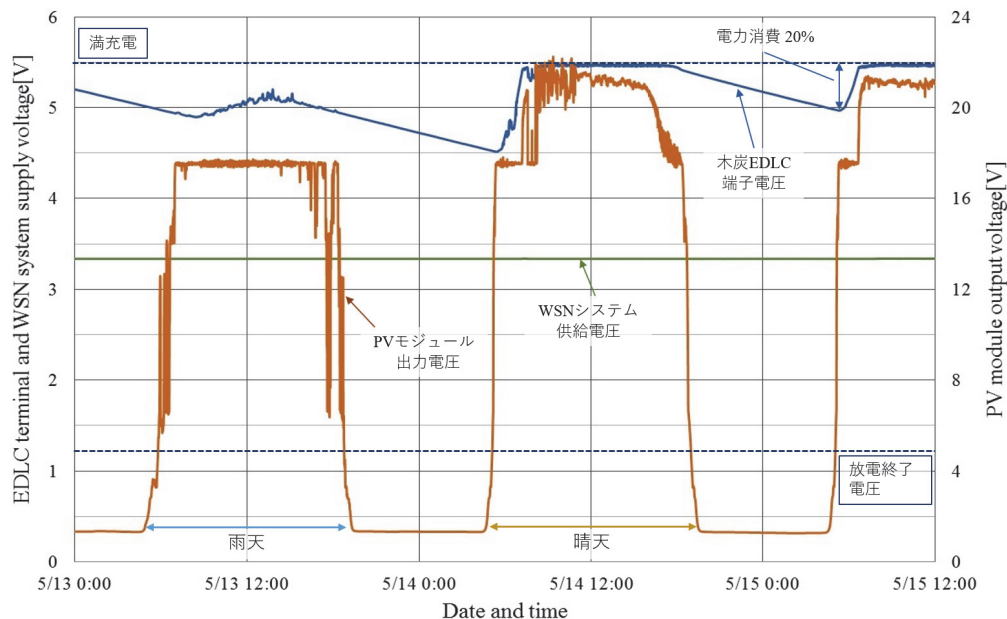


図 4.15 WSN システムの動作実験結果

実証実験の結果から、木炭 EDLC を用いた電源装置は、通信モジュールがルーターとして機能する WSN システム端末に対して、連続した電力供給が可能であり、夜間には木炭 EDLC が有する蓄電容量の 20% にあたる電力を消費することがわかった。また、夜間に消費した電力は、明け方の発電電力が少ない時間帯でも 3 時間で充電が完了した。雨天においては、PV モジュールでの発電量が WSN システム端末の電力消費を上回っているため、日中における木炭 EDLC の電力消費がほとんど無いこともわかった。

これらの結果から、試作した WSN システム端末と木炭 EDLC による電源装置では、日照の少ない日が 4 日程度連続しても運用が可能であり、その間に晴天の日があれば木炭 EDLC を満充電できるため、電源の確保が難しい場所でも安全に利用できると考えられる。

また、図 4.16 に静電容量型水位センサの実験結果を示す。試作した静電容量型水位センサは、室内での動作確認の後、実際の取水口に設置してフィールド実験を行った。室内の実験では、メスシリンダーに水道水を一定量入れ、試作した水位センサ電極部を水中に入れる部分を変化させた際に、出力される電圧値はデジタルテスタ (三和電気計器株式会社, PC5000) を用いて測定された。

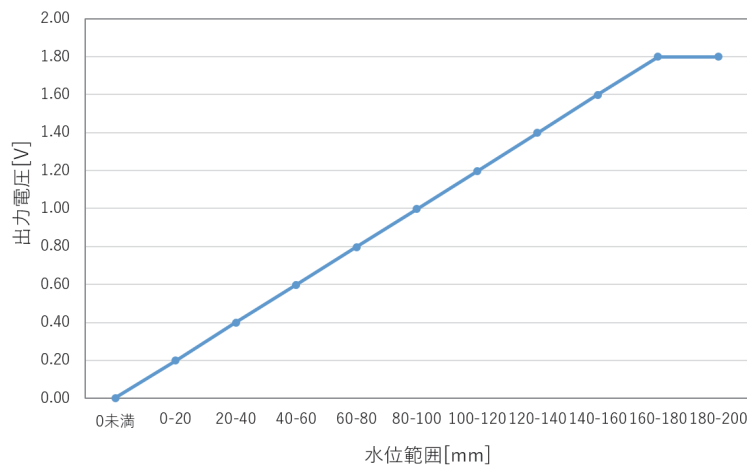


図 4.16 静電容量型水位センサの実験結果

屋内での実験結果から、等間隔 (20 mm) に配置した電極への水の接触に合わせて出力電圧が変化していることがわかった。また、180 mm 以上で出力される電圧に変化しない理由は明らかではないが、実用では 180 mm 以上の電極を使用することが無いいため、実際の取水口に取り付けて実験を行った。

フィールド実験では、当初は取水口の水位を取得できたが、数日後には出力電圧値が不安定になった。原因としては、電極の配線上にゴミが付着することにより、水の表面張力が影響して水分が電極上に留まることで静電容量が不安定になり、当初設定した閾値が合わない状況となることなどが原因として考えられる。水田に注水する水は、河川やため池を水源としているところが多く、上水道のような不純物の少ない水ではなくゴミ等の付着を防ぐことができないため、水が接触する方式のセンサは使用しないこととした。

超音波型水位センサは、バルブの開閉による水位変化を測定できることを目標とした。水槽の中に試作した水位センサを設置し、注水開始と注水停止の際に水位センサの出力値を記録することで動作確認を行った。水位センサから出力されるデータは、USB/シリアル変換ケーブル (Future Technology Devices International Ltd., TTL-232R-5V) を用いてパソコンに接続して、5 分間隔で得られるデータを記録した。

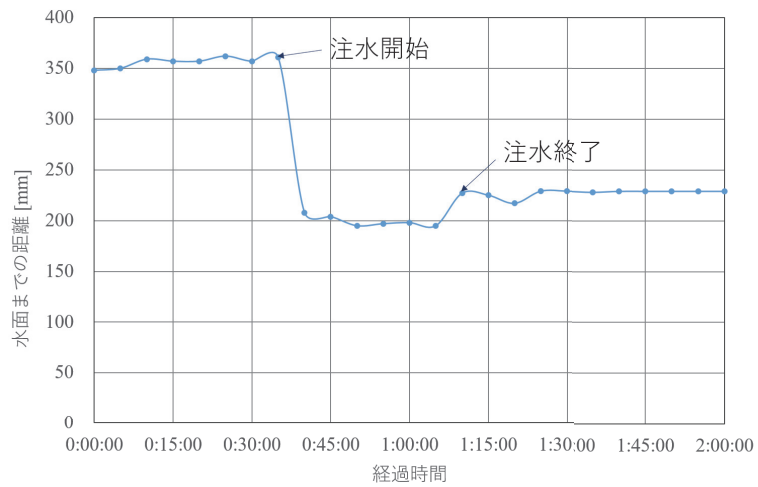


図 4.17 超音波型水位センサの実験結果

図 4.17 に超音波型水位センサの実験結果を示す。記録したデータからは、センサから水面までの距離を表しており、距離が短い時に取水口のバルブが開いて注水されていると判定できる。また、距離が最短の時から 15mm 程度長くなっている時が、水槽への注水が停止している状態であることがわかる。注水を停止後に水位のデータが安定しないときは、注水停止直後に水面に波がある状態を検出していることが推測される。これら結果から、水槽内の水位変化を的確に計測されており、注水開始と停止の状態を判定できることがわかった。

4.5 結言

商用電源の供給が困難な場所に設置する WSN システムを対象とし、独自に開発した木炭 EDLC と市販の PV モジュールを用い、環境負荷が少なく水質汚染の可能性が低い独立型電源装置の試作とその実証実験を行った。また、WSN システムの利用法として、水田における取水口の状態を遠隔で監視するための水位センサの試作を行った。試作した水位センサは、設置場所である水田の状態を想定して機械的な可動部が無い静電容量型と、水と接触することなく測定が可能な超音波型の 2 種類を試作して動作の確認を行った。

電源部の実証実験では、試作した独立電源により中継器として稼働する WSN システムに連続した電力の供給が可能であり、4 日間程度は日照時間が少なくても運用することができることがわかった。試作した電源装置は、災害や故障時等において水田を汚染する可能性が低いことや屋外での使用でも劣化が少ないことなどの特徴を有する。よって、水田等の農作物を扱う場所では安全性に配慮する必要があるため、提案するシステムが有用であると考えられる。

試作した静電容量型の水位センサは、屋内において少ない水道水を用いた実験では、設定した閾値により、水位を 20 mm 間隔で計ることが可能であった。しかし、実際の取水口に設置した場合、農業用水に含まれるゴミや養分がセンサ部分に付着したことにより、水位が下がってもセンサ部に水滴が残ったため、誤ったデータを出力することとなった。超音波型水位センサは、超音波センサから水面までの距離を 1 mm 単位で測定可能であり、注水の開始と終了を水位の変化から判定するために十分な分解能を有することを確認した。課題としては、実験の結果は屋内でのテストであるため、温度変化による測定値の変化への対応や長期的な動作確認を必要とする。

これらの実験結果から、提案する木炭 EDLC と PV モジュールを用いた低環境負荷型独立電源システムは、電源供給が難しい場所に設置する WSN システムに対して有効な電源装置であると言える。また、実際に WSN システムを用いるフィールドとして、水田等の環境対策が必要となる場所において電源供給の課題に対して有効な解決手段である。

参考文献

- [1] Y. Fukushima, M. Fukuma, S. Kishida, S.-S. Lee, K. Yoshino, “Environmentally friendly electrolyte type electric double layer supercapacitor for wireless sensor network system”, Proc. of IEEE Sensors 2017, pp.945-947(2017).
- [2] 日本ソフト開発株式会社, 農業 IOT 通信キット, <https://farm-aiot.com/gatawaykit/>, (2019/12/8).
- [3] ニシム電子工業株式会社, 水田用 MIHARAS, <https://www.nishimu-products.jp/miharas>, (2019/12/8).
- [4] 吉田 将也, 木谷 友哉, 萬代 雅希, 渡辺 尚, “環境発電によって電力供給を行うセンサネットワークでのデータ収集方式”, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, 第 2010 巻, 第 1 号, pp.1037-1048(2010).
- [5] 大塚 孝信, 鳥居 義高, 伊藤 孝行, “災害被害把握を目的とした自律分散 WSN の課題と実装”, 人工知能学会論文誌, 第 31 巻, 第 6 号, pp.AI30-F_1-9(2016).
- [6] 戸上 崇, 坂井 洋平, 山口 典男, 深津 時広, “圃場計測システムについて”, 計測と制御, 第 52 巻, 第 8 号, pp.736-741(2013).
- [7] 株式会社キーエンス, レベルセンサの種類, <https://www.keyence.co.jp/ss/products/process/levelsensor/basics/type.jsp>, (2019/12/8).
- [8] 菅野 允, “微小静電容量の測定と応用”, 応用物理, Vol.49, No.9, pp.55-62 (1980).
- [9] 藤本 郷史, 大久保 孝昭, 小宮 奏恵, “静電容量式小型ぬれセンサシステムの開発および雨漏りや結露を想定した水膜の流動状態の判別”, 日本建築学会技術報告集, 第 20 巻, 第 45 号 (2014).
- [10] Microchip Technology, Application Notes, AN1375, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/CTMU\%2001375a.pdf>. (2019/12/8)
- [11] 丹羽 登, “空気中の超音波による計測と制御”, 計測と制御, 第 3 巻, 第 7 号, pp.483-491(1964).

- [12] 恵下 斂, 川北 一彦, “気柱を伝わる音速の温度変化”, 物理教育, 第 41 卷, 第 1 号, pp.9-11(1993).

第5章

結論

近年、地球規模の異常気象、つまりアマゾンやオーストラリアなどにおける山火事や日本などの強風の発生は、地球温暖化などに関係すると言われている。地球温暖化は北極の氷が解ける速度が速くなっていることなどを根拠とし、地球の平均温度の上昇率が加速されていることを挙げている。これらの対策として CO₂ の削減が提案されている。低炭素社会を実現する再生可能エネルギーの活用や CO₂ の削減などの低環境負荷型の電力システムが必要とされている。なぜなら、現在から将来に向かって人類への電力供給は不可欠であるが、一方、発電、蓄電や負荷の接続時における CO₂ 排出量低減が強く求められるものと考えられる。

本研究では、地球環境にやさしい、つまり低環境負荷型独立電源システムを設計・製作し、それらの実証実験を行い、本電源システムの高性能化などに関する課題を明らかにすることを目的とした。本電源システムは、発電部、蓄電部、電気電子回路制御部や負荷部からなる。

本電源システムの発電部には、PV (PhotoVoltaic) モジュールを用いた。このモジュールは、発電量をほぼ連続的に変えることができ、しかも安価であり、取扱いが容易である。また、本電源システムは独立型なので送配電線に電力投入するために低い直流/交流変換効率のコンディショナーを使用する必要がない。また、本電源システムの蓄電部には木炭 EDLC を用いた。EDLC 蓄電装置は、蓄電容量が少ないが、急速充放電が可能であること、長い充放電サイクルや高い安全性などの特徴を有している。特に、電源システムに用いた木炭 EDLC は、電極材料に循環可能な材料である木炭および鉄を用い、電解液として水酸化ナトリウム水溶液を使用し、低環境負荷型の蓄電装置である。開発した電源システムは、いかなる重金属や有毒な物質を含まないため、故障や災害などで廃棄されても環境に影響を与えない。さらに、水酸化カリウム溶液が電解質として使用されるので、発火

の危険がなく安全である。

本研究では、PV モジュールの発電部、木炭 EDLC の蓄電部、電気電子回路御制御部や負荷部からなる低環境負荷型独立電源システムを設計・製作し、それらの実証実験を行った。これらの実証実験結果から、以下のことが明らかになった。

第 2 章では、発電部に 10 W の PV モジュール、蓄電部に 25 Wh 程度の木炭 EDLC、や負荷部に 0.7 W センサ及び通信モジュールからなる WSN システムを設計・製作した。低環境負荷型独立電源システムとしての実証実験を行った。これらの実験結果から、本システムは、WSN システムに 24 時間の連続した電力供給ができることがわかった。また、悪天候の際には PV モジュールが発電する電力で電力供給が可能であるため、日照時間の少ない季節においても数日間の連続動作ができることが明らかになった。木炭 EDLC を用いた電源システムは環境負荷が少なく安全性が高いため、故障や災害等が想定される農業分野や河川等に対して環境汚染等の観点からも有用であると考えられる。

第 3 章では、発電部に 60W の PV モジュール、蓄電部に 67.1 Wh の木炭 EDLC と負荷に 6 W の LED 照明を用いて屋外照明灯用電源システムを設計・製作した。これらの実証実験結果から、設置当初では LED 照明の点灯時間が 10 時間であったが、2 年 4 ヶ月後では 7 時間程度になることがわかった。したがって、木炭 EDLC を用いた独立電源システムは、屋外照明灯への独立した電源供給が可能であると考えられる。

また、屋外照明灯用電源システムでは 2 年 4 ヶ月後に照明点灯時間が 10 時間から 7 時間に減少した。この実証実験の結果に基づき原因を究明した結果、蓄電部における木炭 EDLC の特性のばらつきによって蓄電部の劣化が生じることがわかった。このため、木炭 EDLC 用の過電圧保護回路の設計・製作を行なった。これらの保護回路を用いた実験結果から、充電段階で過電圧が抑制され、より長い時間のメンテナンス・フリーの低環境負荷型独立電源システムとなることが予想される。

次に、発電部に 435 W の PV モジュール、蓄電部に、200 Wh の木炭 EDLC と負荷に 8.4 W の Wi-Fi 機器を用い、オフグリッド Wi-Fi 連続稼働電源システムを設計・製作して実証実験を行った。さらに、2 種類の定格電圧が異なる木炭 EDLC を用い、蓄電されている電力の利用効率についても同時に実証実験を行った。これらの実証実験の結果から、PV モジュールにより得られた電力で木炭 EDLC への充電と負荷への放電を同時に行い、24 時間連続で Wi-Fi 機器への電力供給ができることがわかった。また、木炭 EDLC の定格電圧は、高く設定すると蓄電電力の利用効率が高く、同容量の木炭 EDLC よりも機器を長時間稼働できることが明らかになった。長寿命かつ耐久性が高いオフグリッドの電源システムは、設置する情報通信機器の制約を減らすだけでなく、非常用電源としての役割も果たすため、有効な電源システムはであると考えられ。

さらに、発電部に 800 W の PV モジュール、蓄電部に 1 kWh の木炭 EDLC と負荷に 100 W 以下の負荷 (家電) を想定した低環境負荷型独立電源システムの設計・製作を行った。充電制御回路は、3 系統の降圧型 DC/DC コンバータを並列に接続し、充電時の電流を構成するデバイスに分散して流すことで木炭 EDLC の効率的な充電を実現した。また、木炭 EDLC の出力電圧を安定させる出力制御回路は、2 系統の昇圧型 DC/DC コンバータを並列に接続して使用することで、電力変換効率の向上を実現した。これらの制御回路は複数で構成される DC/DC コンバータを駆動する信号の位相をずらし、回路中に急峻な電流の流れを抑制することでデバイスを小型化できることが明らかになった。この電源制御回路に負荷 48 W の LED 照明を接続して実証実験を行い、24 時間連続電力供給が可能であることがわかった。これらの結果から、木炭 EDLC を使用した 1kWh より大型低環境負荷型独立電源システムの設計・製作に成功した。大型蓄電装置は、環境負荷が少なく安全な蓄電装置として有効な手段であることがわかった。さらに、このシステムはサイクル特性の良い蓄電器であるため、定期的な蓄電器の交換を必要としない安定した蓄電システムを構成できる可能性があると考えられる。

第 4 章では、木炭 EDLC を用いた低環境負荷型独立電源システムと水田での注水バルブの水位を検知するセンサからなる WSN システムを設計・製作した。この章の電源システムは、発電部に 10 W の PV モジュール、蓄電部に 15 W 程度の木炭 EDLC と新たに設計した電力制御回路からなっている。負荷となる WSN システムは、通信部に 920 MHz 帯の LPWA モジュールをルータとして使用した。これらの実験結果から、設計・製作した電源システムは少ない日照時間でも、4 日間程度の WSN システムを連続稼働ができることがわかった。また、新奇の超音波型水位センサを設計・製作し、注水バルブの状態を推定するのに十分な性能を有することがわかった。したがって、提案する電源システムでは低環境負荷でしかも劣化が少ない特徴を有する蓄電部を用いているので、水田等の農作物を扱う場所、つまり有害物質などへの安全性を考慮する必要がある場所での利用に適していると考えられる。

本研究では、PV モジュールの発電部、木炭 EDLC による蓄電部、電気電子回路による制御部と夜間照明などの負荷部からなる低環境負荷型独立電源システムを設計・製作した。さらに、これらの電源システムの実証実験を行い、開発された木炭 EDLC を用いた低環境負荷型独立電源システムは、地球環境を保全しながら快適な安心・安全な生活を維持するために必要な技術の一つであると考えられる。

今後は、より大きな電力容量を持つ低環境負荷型独立電源システムの開発は緊急の課題であると考えられる。また、木炭を原料とする活性炭と水溶液系の電解液等で構成する木炭 EDLC は、その特徴である低い環境負荷、安全性と長いサイクル寿命から、再生可能

エネルギーの活用には有効な電源システムであることが明らかにした。今後、電力網が整備されている先進国だけでなく、電力供給が難しい地域においても電力を供給する一手法として有効であると考えられ、設置場所や使用環境に合わせた開発を推進する予定である。

謝辞

本研究は、著者が松江工業高等専門学校に平成 18 年 4 月に勤務して以来、現在までの研究成果の一部をまとめたものである。

本研究に関して、鳥取大学工学部電気情報系学科の李相錫教授には懇切なご指導及びご助言を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表す次第であります。

本論文をまとめるにあたり、有益なるご討論と丁寧なご助言を賜りました鳥取大学工学部電気情報系学科市野邦男教授及び松永忠雄准教授に深く感謝いたします。

鳥取大学工学部特任教授の岸田悟教授には鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程に入学した時から本論文をまとめるまで、ご指導とご鞭撻を賜りました。心からお礼を申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、松江工業高等専門学校電気情報工学科の福間眞澄教授には研究の初期段階から本研究を遂行するための基礎知識や技術などのご指導とご鞭撻を賜りました。心から深くお礼申し上げます。

さらに、木炭 EDLC の製造や評価をしていただいた松江工業高等専門学校の高橋信雄名誉教授及び“里山照らし隊”の皆様にお礼申し上げます。

さらに、著者が所属する松江工業高等専門学校実践教育支援センターの皆様には、普段の業務面からの支援および配慮だけでなく、他分野からの研究に係わる力添えをいただき、円滑に研究を進めることができました。心からお礼を申し上げます。

最後に、本研究を遂行する間、仕事と学業の両立を献身的に支え、生活面での不便にも辛抱してくれた妻(恵)、息子(優理)に感謝いたします。

研究業績

- 学位論文に関係した研究業績

	題目	雑誌名・会議名
第 2 章	Environmentally Friendly Electrolyte Type Electric Double Layer Supercapacitor for Wireless Sensor Network System	Proceedings of 2017 IEEE SENSORS, pp.945-947 (2017).
第 2 章	A KOH Solution Electrolyte-Type Electric Double-Layer Supercapacitor for a Wireless Sensor Network System	IEEE Sensors Letters, Vol.2, No.3, 7500904 (2018).
第 3 章	木炭 EDLC を用いた屋外照明用電源装置	電気設備学会 論文誌, 第 38 巻, 第 3 号, pp.17-22 (2018).
第 4 章	Application of Electric Double Layer Capacitor and Water Level Sensor to Rice Field Monitoring System	Proceedings of 2018 IEEE SENSORS, pp.381-384 (2018)

- 研究業績-査読付学術論文 (査読付きプロシーディング含む)-
 - (1) Y.Fukushima, M.Fukuma, S.Kishida, S.Lee, K.Yoshino, “Environmentally Friendly Electrolyte Type Electric Double Layer Supercapacitor for Wireless Sensor Network System” , Proceedings of 2017 IEEE SENSORS, pp.945-947 (2017).
 - (2) 福島志斗, 福間眞澄, 岸田悟, 李相錫, 吉野勝美, “木炭 EDLC を用いた屋外照明用電源装置” , 電気設備学会 論文誌, 第 38 巻, 第 3 号, pp.17-22 (2018).
 - (3) Yukito Fukushima, Masumi Fukuma, Katsumi Yoshino, Satoru Kishida, Sang-Seok Lee, “A KOH Solution Electrolyte-Type Electric Double-Layer Supercapacitor for a Wireless Sensor Network System” , IEEE Sensors Letters, Vol.2, No.3, 7500904 (2018).
 - (4) Y.Fukushima, M.Fukuma, M.Hirose, K.Sugiyama, M.Kawami, K.Yoshino, S.Kishida, S.Lee, “Application of Electric Double Layer Capacitor and Water Level Sensor to Rice Field Monitoring System” , Proceedings of 2018 IEEE SENSORS, pp. 381-384 (2018).

- 研究業績-国際会議・発表-
 - (1) Y.Fukushima, M.Fukuma, S.Kishida, S.Lee, K.Yoshino, “Environmentally Friendly Electrolyte Type Electric Double Layer Supercapacitor for Wireless Sensor Network System” , Proceedings of 2017 IEEE SENSORS, pp.945-947 (2017).
 - (2) Y.Fukushima, M.Fukuma, M.Hirose, K.Sugiyama, M.Kawami, K.Yoshino, S.Kishida, S.Lee, “Application of Electric Double Layer Capacitor and Water Level Sensor to Rice Field Monitoring System” , Proceedings of 2018 IEEE SENSORS, pp.381-384 (2018).
 - (3) Yukito Fukushima, Tomoaki Kageyama, Tetsuro Seiyama, Sumio Kurose, Tadao Matsunaga, Sang-Seok Lee, “A Low-Cost Water Flow Sensor” , The 10th Japan-China-Korea Joint Conference on MEMS/NEMS 2019, pp.110-111 (2019).

● 研究業績-国内会議・発表-

- (1) 田中直樹, 飯塚育生, 福間眞澄, 福島志斗, 内田孝幸, “EDLC を用いたセンサーネットワーク実証試験器の試作”, 平成 25 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p. 423 (2013).
- (2) Manabu Takao, Taihei Nozaka, Tatsuya Fujie, Shohei Suto, Yukito Fukushima, “Field Trial of Novel Vertical Axis Wind Turbine”, Proceedings of 3rd International Symposium on Technology for Sustainability, Hong Kong, China, Paper ID.239 (2013).
- (3) 田中直樹, 飯塚育生, 福間眞澄, 福島志斗, 内田孝幸, “EDLC を用いたセンサーネットワーク実証試験機の試作 (2)”, 平成 26 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p.120, 福山大学 (2014).
- (4) 岡田信志, 福間眞澄, 飯塚育生, 福島志斗, 内田孝幸, 小川仁一, 吉野勝美, “木炭と水系電解液を用いた電気二重層キャパシタの可能性”, 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, No.2-10 (2015).
- (5) 田中直樹, 飯塚育生, 福間眞澄, 福島志斗, 内田孝幸, “EDLC を用いたセンサーネットワーク実証試験機の試作 (3)”, 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, No.4 – 9 (2015).
- (6) 福島志斗, 福間眞澄, 内田孝幸, 小川仁一, 吉野勝美, “EDLC を用いた屋外照明灯の実証試験”, 平成 27 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, No.5-6 (2015).
- (7) 福島志斗, 福間眞澄, 内田孝幸, 小川仁一, 吉野勝美, “水系 EDLC を用いた屋外照明灯の実証試験”, 2016 年 (第 34 回) 電気設備学会全国大会, H-12 (2016).
- (8) 石原克奎, 本多将和, 池田総一郎, 福島志斗, 齊藤陽平, 藤岡美博, “自動二輪車運転技能可視化装置に関する研究”, 日本機械学会中国四国学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会論文集, P.619 (2017).
- (9) 藤岡美博, 本多将和, 福島志斗, 池田総一郎, 小吹健志, 泉大樹, 石原克奎, 齊藤陽平, “自動二輪車運転技能可視化装置に関する研究 (センサシステムの評価)”, 日本機械学会 2017 年度 年次大会, G1800301 (2017).
- (10) 本多将和, 藤岡美博, 福島志斗, 池田総一郎, 小吹健志, 泉大樹, 齊藤陽平, “自動二輪車運転技能可視化装置に関する研究—可視化システムの開発—”, 自動車技術会 2017 秋季大会 学術講演会講演予稿集, pp.506-510 (2017).
- (11) 有田聖矢, 福間眞澄, 福島志斗, 吉野勝美, “電解液に NaOH を用いた木炭 EDLC の可能性”, 平成 29 年度 (第 68 回) 電気・情報関連学会中国支部連合

大会, R17-02-05 (2017).

- (12) 福島志斗, 福間眞澄, 岸田悟, 李相錫, 吉野勝美, “水溶液系 EDLC を用いた大型蓄電システムの実証実験”, 平成 29 年度 (第 68 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会, 岡山理科大学, R17-07-11 (2017).
- (13) 福間眞澄, 福島志斗, 吾郷匠実, 有田聖矢, 今岡洋人, 吉野勝美, “木炭を利用した水系電解液 EDLC の分担電圧”, 平成 30 年電気学会全国大会講演論文集, Vol.2, p.84 (2018).
- (14) 福島志斗, 福間眞澄, 廣瀬誠, 杉山耕一郎, 川見昌春, 岸田悟, 李相錫, 吉野勝美, “EDLC による環境に配慮したセンサネットワーク用電源の実証試験”, 2018 年 (第 36 回) 電気設備学会全国大会, D-15 (2018).
- (15) 福島志斗, 福間眞澄, 杉山耕一郎, 吉野勝美, “二次電池の出力特性を模擬した木炭 EDLC による独立型電源装置”, 平成 31 年電気学会全国大会, 3-170 (2019).