

[事例論文]

太陽光発電と蓄電池を活用した独立系直流LED照明システムの導入に伴う戸建て住宅の電力消費由来CO₂排出削減効果とCO₂ペイバックタイムの推計

天野 耕二^{1,*}, 土居 義浩², 福原 大祐², 吉川 直樹¹, 島田 幸司³

1 立命館大学 理工学部, 2 立命館大学大学院 理工学研究科, 3 立命館大学 経済学部

*連絡先: amano@se.ritsumei.ac.jp

概要: 太陽光発電と蓄電池を活用した独立系直流LED照明システムの導入に伴う一般戸建て住宅の電力消費由来CO₂排出削減量とCO₂ペイバックタイムを推計した。独立系直流LED照明システムの中では、蓄電容量を夜間照明消費分に留めたLED照明システムのCO₂排出削減効果が比較的大きいことがわかった。蓄電容量を昼間の余剰電力全てを蓄電できるまで増やしたシステムにおいては、毎日深放電を繰り返すことで蓄電池の寿命年数が相対的に短くなることが年間当たりの製造段階における排出量の増大に影響していた。独立系直流LED照明システムのCO₂ペイバックタイムは1.5年から2年程度となったが、系統電力のCO₂排出係数に加えて、PVの発電電力、蓄電池の充放電深度から生じる製品寿命などの地域差によるばらつきが見られた。

キーワード: ライフサイクルCO₂、CO₂ペイバックタイム、直流LED照明システム、太陽光発電、リチウムイオン電池

1. はじめに

2014年度における家庭部門のエネルギー消費は消費量全体の14.3%を占めており、1973年度比では約2倍の増加となっている¹⁾。家庭内のエネルギー消費の内訳を見ると、動力・照明他の占める比率が1973年度の23.0%から2014年度では38.1%と2倍近くとなっており¹⁾、家庭部門におけるエネルギー消費量を削減するためには、これらの機器に対して優先して対策することが重要であると考えられる。

照明に関しては、省エネルギー効果の高いLED照明の普及が進んでおり、各種光源商品の製造から廃棄までの評価が報告されている²⁾。家庭用太陽光発電設備の導入も増加しているが、従来の照明システムでは、太陽光発電システムによる発電電力を利用する際、直流から交流への変換を行い、点灯の際に再度交流から直流への変換を行っており、エネルギーの変換ロスが生じている。また、太陽光発電の昼間の余剰電力を蓄電しない場合は、夜間に生じる照明用電力需要を自家消費として賄うことができない。太陽光発電と蓄電池を活用した独立型の直流電源グリッドの基礎技術および社会システム化技術の検証実験も始まっているが³⁾、住宅単位での余剰電力の蓄電や売電を考慮した環境負荷評価は未だなされていない。

本研究では、家庭における照明システムを新たな利用形態へ転換することが可能である独立系直流LED照明システムに着目し、一般戸建て住宅を対象に太陽光発電と蓄電池を活用した独立系直流LED照明システムを導入した際の環境的パフォーマンスを住宅全体の電力消費由来CO₂排出

削減量とCO₂ペイバックタイムにより評価する。

2. 研究対象

2.1 独立系直流LED照明システム

本研究で対象とする独立系直流LED照明システムでは、太陽光発電システム（Photovoltaic、以降PV）による発電電力を蓄電池に貯蔵し、DC/DCコンバータにより直流状態で電圧の変更を行うことにより交流への変換を行わずLED照明に利用するシステムである。発電から蓄電、照明機器まですべて直流で統一した設備の市販も始まっており⁴⁾、海外でのビジネスモデルも報告されている⁵⁾。朝～昼間におけるPVの発電電力は家庭内の電力消費全般に利用、余剰電力を蓄電し夜間の照明に利用する。照明を点灯する用途に絞るとすれば蓄電池容量を小さく抑えられるが、災害時における有用性は低下すると考えられるため、本研究ではPVによる昼間の余剰電力を全て蓄電できるシステムについても検討対象とした。また、蓄電容量を超える余剰電力については売電（逆潮流）を行うこととした。本研究のシステム境界は、PV・蓄電池・照明器具の製造と廃棄、世帯（住宅）全体の電力消費（売電によるマイナス分を含む）の範囲である。なお、系統電力による買い取り制限は考慮していない。

2.2 各種条件設定

2.2.1 システム導入条件

日本全国の地域特性を考慮するために、札幌、仙台、

東京（23特別区）、名古屋、大阪、広島、高松、福岡の8都市を対象とした。導入対象に関しては一般戸建住宅を想定し、世帯人員に関しては4人とした。

太陽光発電システムパネルの設置角度に関しては、一般に最も効率の良いとされる方位南向き 0° 、傾斜 30° とし、照明システムに関しては、設定した一般的な戸建住宅建築物の間取⁶⁾における各部屋全てに対して必要照度を満たすよう照明設計を適用した。

2.2.2 照明計画

設定した建築物間取に基づいて各部屋の用途（読書・団らん・調理等）を設定し、用途別の必要照度（JIS基準⁷⁾を基に照明の種類と規模を選定する。照度計算には照明率、反射率および保守率に基づいて計算する。照明率は、「ランプから直接作業面に到達する光」「天井から反射する光」「壁から反射する光」「床から反射する光」および「これらの光が何度も反射を繰り返した相互反射による光」が作業面に到達する割合を表したものであり、ランプ固有に定められた「壁面の反射率と室指数との関係」により決定される。反射率に関しては壁面の素材により変化するが、本研究では、一般的な値と考えられる数値（天井50%、壁50%、床10%）に全部屋統一した。保守率は、時間経過による劣化が照度に及ぼす影響を数値化したものであり、照明率と同じく、ランプ固有の特性により変化するものである。

対象とした建築物の間取と部屋用途および行動別の必要照度 [lx]（JIS Z9110の基準に基づく⁷⁾）を満たすよう照明計画を実施し、照明の種類（シーリングライト等）に関しては実際の住宅を参考とし、一般的なものを選定した。また、研究対象によって部屋内の照度が異なると単純な比較を行うことが出来ないため、全研究対象において必要照度を丁度満たすよう設計した。そのため、実際の市場に出回った照明とは多少異なる規模のものも存在する。

2.2.3 設置設備（PV及び蓄電池）

PVに関しては、戸建住宅において一般的に利用される種別（多結晶Si太陽光発電システム、出力4 kW、モジュール寿命17年）とし、パワーコンディショナー（変換効率0.94、製品寿命10年）に関してもこれに対応した定格出力のものを選定した。蓄電池に関しては、種別をリチウムイオン電池（充電効率0.95）とし、蓄電容量に関しては、2.3で述べる各システムに応じた容量に設定する。また、蓄電池の寿命年数については、利用状況（主に放電深度）によって利用可能なサイクル数（1日1サイクルとして耐用年数

に換算）は大きく変動することから、本研究では、直近の技術動向⁸⁾を参考に、耐用年数（サイクル寿命）と放電深度との関係を非線形回帰モデルにより設定する。放電深度100%、80%、50%、20%における限界サイクル数を各々1000、1750、4250、5750として、[耐用年数] = $420 \times [\text{放電深度}(\%)]^{-1.03}$ ($R^2 = 0.8344$) 式を適用した。

2.3 システム設定

汎用蛍光灯システム（照明は蛍光灯のみ、PVおよび蓄電池は無し）を比較対象として、まず汎用PVシステム（戸建て住宅用の一般的規模（4.0 kW）PVあり、蓄電池無し、照明は蛍光灯またはLED）を想定する。PVに蓄電池を組み合わせたシステムとしては、照明分のみを賄う蓄電池容量にすることが経済的な面から一般的と考えられるが、本研究では、照明以外の用途も含めた世帯全体の電力消費を考慮しながら、災害時における有用性を鑑みて照明分以外の夜間電力消費を賄うことが出来る様々な容量の蓄電池を導入する場合に関しても考察する。

- i. 夜間照明負荷と同等容量のシステム
- ii. 一般的PV規模（4 kW）での余剰電力を全て蓄電可能な容量とするシステム

また、蓄電池を導入することで蓄電電力の利用方法も多様となるが、本研究では上記システム ii において以下のシナリオを設定する。

- a. 蓄電電力について夜間照明を含む全電力負荷に対して利用するシステム

b. 蓄電電力について夜間照明にのみ利用するシステム
蓄電容量を夜間照明負荷と同等規模（上記システム i）に設定する際は、全ての月において条件を満たすことができるよう1～12月までの最大負荷に設定することとする。余剰電力の算出に関しては、各都市の時間帯別負荷とPVによる発電量に基づいているが、これらの推計の詳細は3.2に記す。なお、蛍光灯とLED照明の場合とでは必要な蓄電容量が異なるため、各システムについて、蛍光灯の場合と同等の蓄電池容量でLED照明を使用するシステム（LEDシステム2）を想定した。また、必要な蓄電容量は総負荷や日射量などの都市特性によっても変化する。特に、システム ii -a,bの蓄電容量には相当の差異（2.8～7.8 kWh程度）を想定しているが、これは各都市の総負荷および日射量の違いによる余剰電力の差に起因している。加えて、蓄電池の耐用年数は放電深度に依存しているため、深放電で利用する必要があるシステムのほうが蓄電池の耐用年数が短くなることにも注意が必要である。これらのシステム設定条件一覧を表1に示す。

表1 システム設定条件一覧

		太陽光発電	パワーコンディショナー	蓄電池	照明
汎用蛍光灯		無し	無し	無し	蛍光灯
汎用PV	蛍光灯	有り (戸建て住宅用, 4.0 kWh)	有り	無し	蛍光灯
	LED				LED
システム i	蛍光灯		有り	有り (夜間照明分)	蛍光灯
	LED		有り (照明以外に使用)		LED
	LED2				
システム ii -a	蛍光灯		有り	有り (昼間余剰分, 夜間全負荷に使用)	蛍光灯
	LED		有り (照明以外に使用)		LED
	LED2				
システム ii -b	蛍光灯		有り	有り (昼間余剰分, 夜間照明のみに使用)	蛍光灯
	LED		有り (照明以外に使用)		LED
	LED2				

3. インベントリ分析

3.1 製造段階

太陽電池モジュール、パワーコンディショナーや接続箱、アレイ架台、配線材料等の製造に関わるCO₂排出量は、既往の研究における算出結果⁹⁾を2.3で設定した規模に換算した。蓄電池に関しては、種別としてリチウムイオン電池を採用することとし、その製造段階におけるCO₂排出量は、既往の研究¹⁰⁾より引用した。いずれも製品寿命（太陽電池モジュール：17年、パワーコンディショナー等：10年、蓄電池：利用状況（主に放電深度）によって利用可能なサイクル数を変動させたため、後述で示すように都市やシナリオにより4～9年程度の範囲）に基づいて1年間あたりの値に換算した。

照明器具の製造段階におけるCO₂排出量に関しては、照明機能の全ライフサイクルステージにおける割合として非常に小さい（製造・廃棄段階合わせ約0.2%）²⁾とされていることから、蛍光灯およびLEDランプ共に、既往の研究に記載されている中央値²⁾を全ての器具に対して適用することとし、定格寿命（蛍光灯：6,000時間、LEDランプ：40,000時間）と3.2に後述する点灯時間に基づいて1年間あたりの値に換算した。

3.2 運用段階

2.2.2に記した照明計画結果に基づいて、都市別月別の各建築物内の消費電力量 [kWh] を算出する。太陽光発電システムの発電電力および蓄電池の関係を考慮する観点から、各時間帯別（1～24時）の分析も必要となる。発電量は、京セラの発電シミュレーション¹¹⁾に基づいて算出した。年間時別日射量データベース（METPV-11）¹²⁾より対象8都市毎に傾斜角30°、方位南0°における時別日射量のデータ（1990～2009年の日毎の平均値）を得る。

月毎のサンプル日は、該当する月において平均的な日射量と見なせる日の時刻別日射量を月毎の発電量予測に用いることとする。

照明の点灯時間に関しては、各建築物内での人間の行動を総務省統計局の社会生活基本調査¹³⁾により推計し、平日・土曜・日曜それぞれに関して時間帯別の行動とその行動に必要な照度から各部屋の点灯時間を算出する。住まいの手入れや世帯管理などの対象の部屋を絞ることのできない行動に関しては、全部屋を満遍なく利用するものとした。また、4人家族を想定していることから行動が重複することも考えられるため、その可能性がある生活行動に関しては別々の部屋で行動することが一般的であると考えられる場合は、各々が別の部屋の照明を点灯することとなる。また、昼光照度に関しても考慮することとし、各行動の必要照度が昼光照度により満たされている時間帯では、照明を点灯する必要はないものとする。なお、照明以外の電力消費量に関しては、エネルギー消費状況調査¹⁴⁾および家計調査¹⁵⁾を参照しながら、戸建て4人世帯における都市別季節（月）別の消費量を推計した。用途別の電力消費内訳については、地域や季節による変動があったが、照明分は7～11%となり、照明以外では空調・給湯が41～57%、動力が36～48%となった。

設定した全シナリオ（8都市と2.3で設定したシステムの組み合わせ）において、毎月（1～12月）各時間帯別の電力消費量と発電量に基づいて蓄電量を推計する。蓄電容量を上回る昼間の余剰電力は全て売電（逆潮流）するものとし、売電に伴うCO₂排出削減評価の際に使用する系統電力のCO₂排出係数については、電気事業者ごとの実排出係数（平成24年度実績値）¹⁶⁾を適用した。表2に都市別の年間電力消費量（戸建て4人世帯）とCO₂排出係数（系統電力）を示す。一般家庭の電力消費量については、世帯人数

および建て方（戸建て、集合）による変動が極めて大きく、エネルギー消費状況調査¹⁴⁾においても2,368 kWh（集合住宅1人世帯）～9,669 kWh（戸建て住宅6人以上世帯）の範囲となっている。本研究では戸建て4人世帯（全国平均で7,438 kWh）を対象としているが、世帯全体の電力消費量に占める照明分の比率は全体消費量が大きくなるほど小さい値となることにも留意する必要がある。

表2 都市別の年間電力消費量（戸建て4人世帯）とCO₂排出係数（系統電力）

	kWh/世帯・年	kg-CO ₂ /kWh
札幌	6,810	0.688
仙台	7,127	0.600
東京	7,687	0.525
名古屋	7,175	0.516
大阪	7,300	0.514
広島	7,872	0.738
高松	7,443	0.700
福岡	6,345	0.612

3.3 廃棄段階

廃棄・リサイクル段階のライフサイクルに占めるCO₂排出量の割合は相対的に小さく⁹⁾、全体の結果に与える影響は少ないと予想されるため、本研究では、各システムとも粉砕と埋め立て処理のみに統一した。処理場までの輸送距離は50 kmとし、粉砕・埋め立てに関わる原単位は、CO₂換算量共通原単位データベース¹⁷⁾より得た。

4. 結果と考察

4.1 シナリオ別ライフサイクルCO₂算定結果

対象8都市における算定結果（1年間に換算した世帯全体の電力消費に伴うライフサイクルCO₂排出量内訳）をそれぞれ図1～図8示す。i・ii-a・ii-bの記号に関しては、2.3で設定したシステムに対応している。汎用蛍光灯システム（PV、蓄電池無し）が比較対象であり、汎用PVシステムは戸建て住宅用の一般的規模（4.0 kW）PV（蓄電池無し）システムである。いずれも、照明以外の用途も含めた世帯全体の電力消費を考慮している。

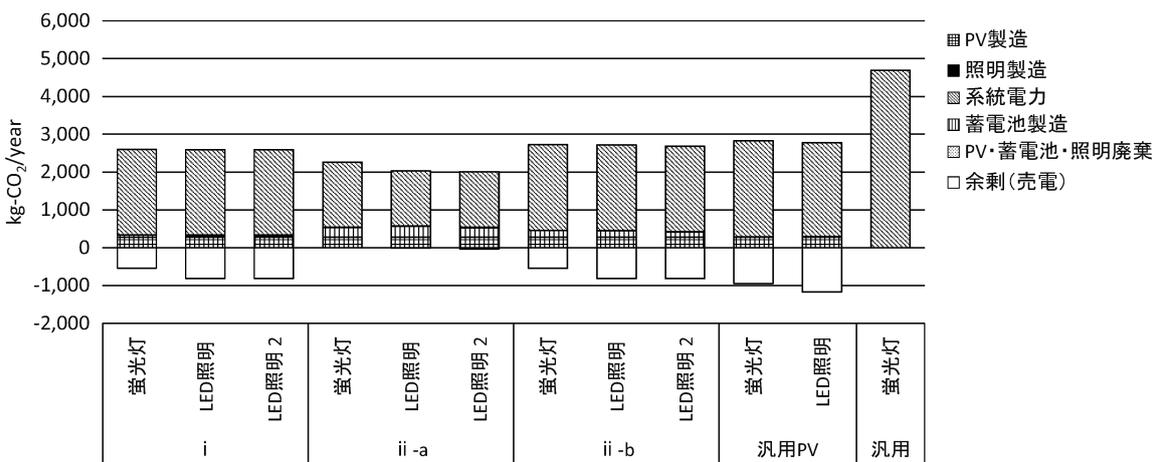


図1 ライフサイクルCO₂算定結果（札幌）[kg-CO₂/年]

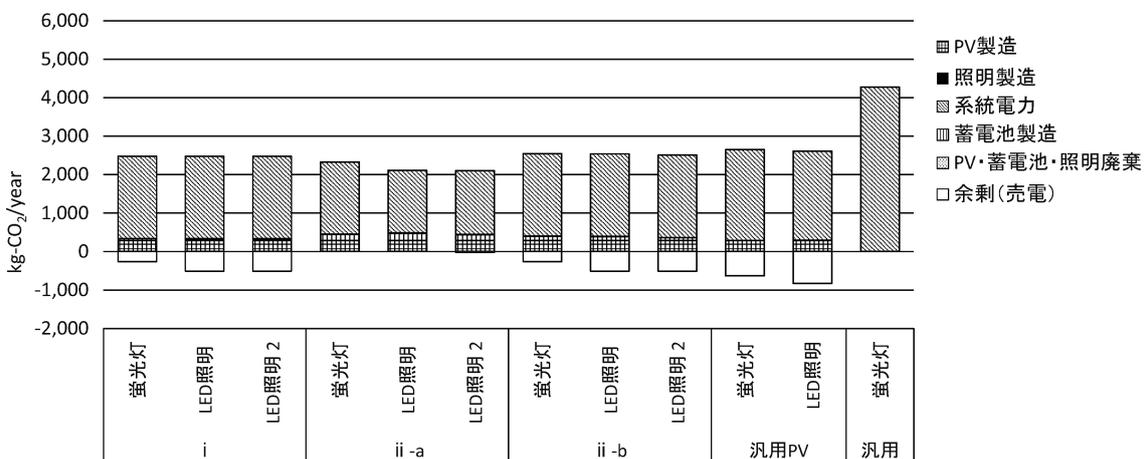


図2 ライフサイクルCO₂算定結果（仙台）[kg-CO₂/年]

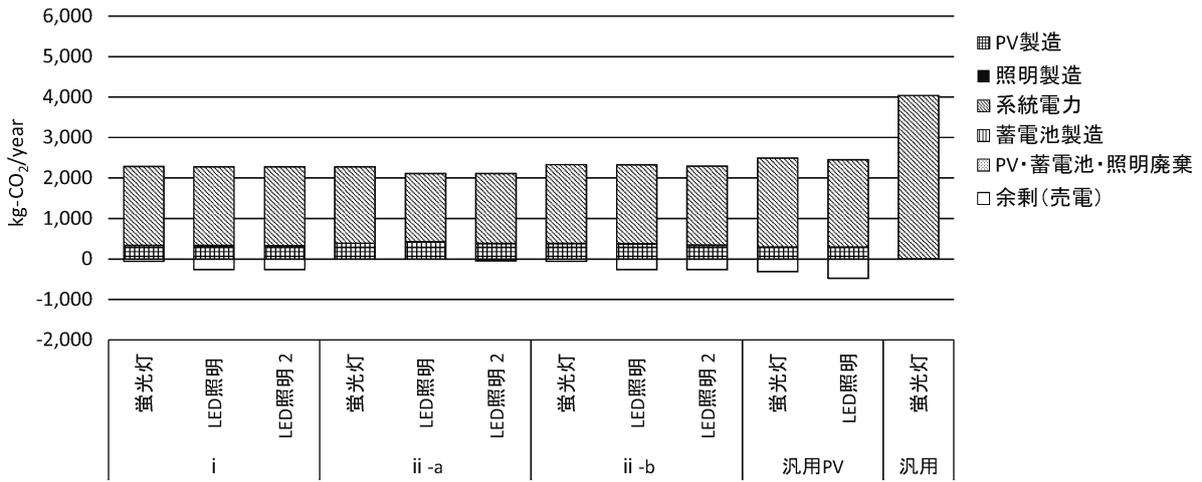


図3 ライフサイクルCO₂算定結果 (東京) [kg-CO₂/年]

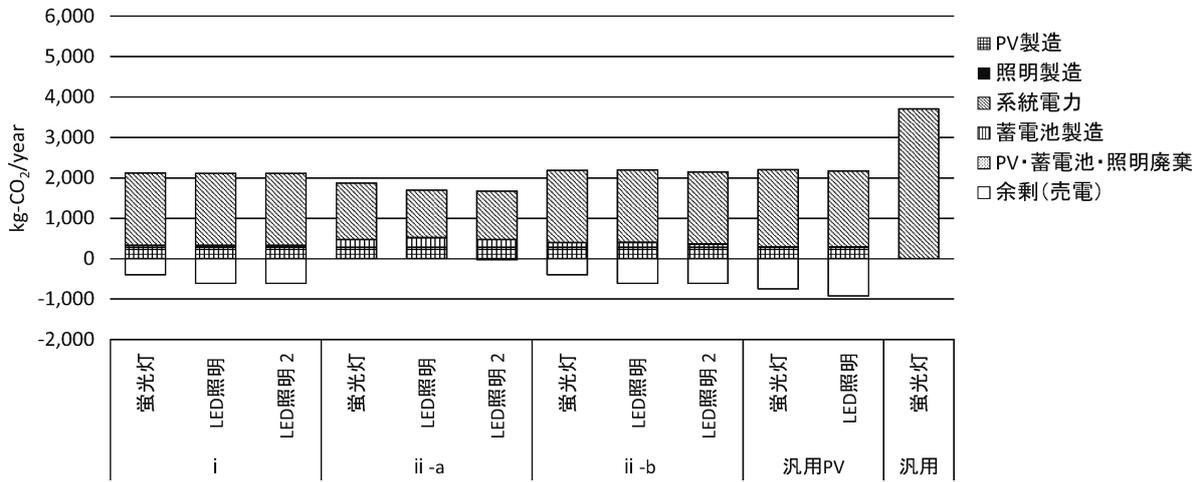


図4 ライフサイクルCO₂算定結果 (名古屋) [kg-CO₂/年]

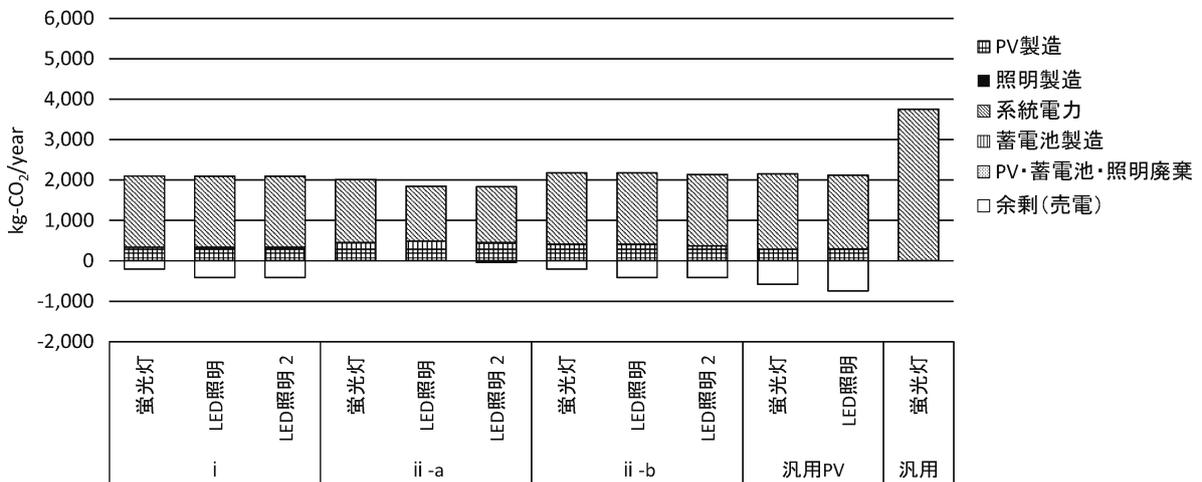


図5 ライフサイクルCO₂算定結果 (大阪) [kg-CO₂/年]

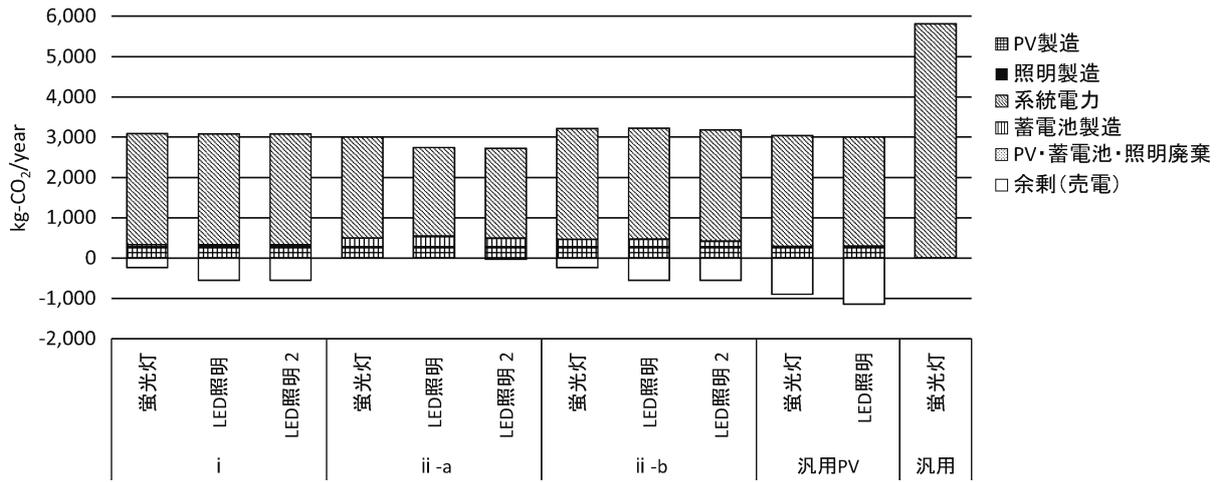


図6 ライフサイクルCO₂算定結果 (広島) [kg-CO₂/年]

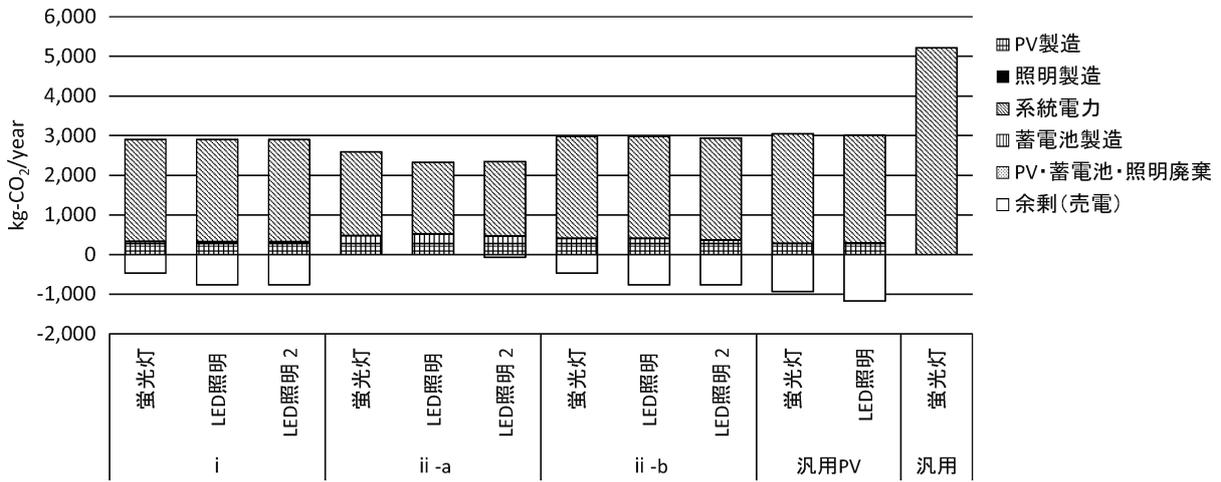


図7 ライフサイクルCO₂算定結果 (高松) [kg-CO₂/年]

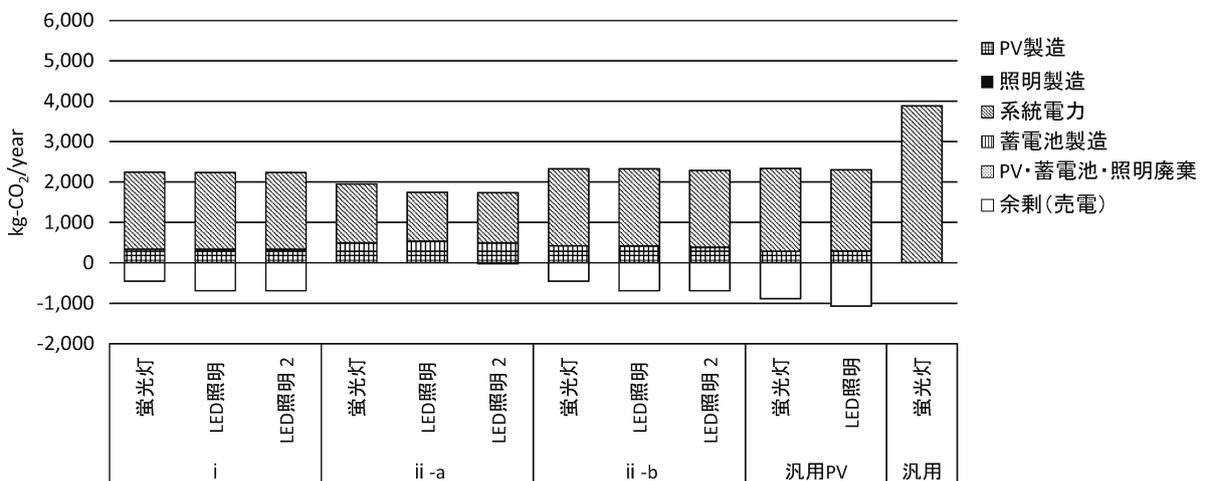


図8 ライフサイクルCO₂算定結果 (福岡) [kg-CO₂/年]

昼間の余剰電力を売電（逆潮流）した際の電力が損失なく系統電力において利用されたと仮定し、売電による削減分を差し引いた総排出量について汎用（太陽光発電、蓄電池いずれも無し）と比較すると、全てのシステムで削減効果が期待できることがわかる。その場合では、最も総排出量の少ないシステムは汎用PVシステムLED照明となり、汎用に対する削減率は51%～68%であった。独立系直流LED照明システム（i・ii-a・ii-b）の中で最も総排出量が少ないシステムは、システムi（LED照明）となり、削減率は50%～62%であった。蓄電池付き独立系直流LED照明システムにおける削減率が蓄電池無しのLED照明システムにおける削減率を下回った要因としては、パワーコンディショナーの変換効率（0.94）と蓄電池の充電効率（0.95）がほぼ同等の値で設定されたため、AC/DC変換ロスを回避する効果が十分に反映されていないことによるものと考えられ、汎用システムに対する削減効果のほとんどはPV導入効果となっている。削減量における売電分の割合は、汎用PVシステムLED照明では17%～36%、システムi（LED照明）では13%～29%であった。ただし、本研究においては蓄電容量を上回る昼間の余剰電力は全て売電（逆潮流）するものとしているが、実際の運用においては送電ロスや系統側の制約による買い取り制限の可能性も考えられる。試みとして、余剰電力の80%および60%を売電できた場合の汎用システムに対するCO₂排出削減率を算出すると、汎用PVシステムLED照明では49%～64%（余剰電力80%売電）および46%～60%（余剰電力60%売電）、システムi（LED照明）では49%～59%（余剰電力80%売電）および49%～55%（余剰電力60%売電）となり、先に述べた全余剰電力売電の場合と比較して売電制約が大きくなるほど削減率は小さくなった。削減量における売電分の割合は、汎用PVシステムLED照明14%～31%（余剰電力80%売電）および15%～29%（余剰電力60%売電）、システムi（LED照明）では11%～25%（余剰電力80%売電）および8%～20%（余剰電力60%売電）であった。

システムii間の比較では、システムb（余剰電力は夜間の照明のみに利用するシナリオ）の方が総排出量は小さくなることからわかる。前述の通り、売電分の全てが排出削減に繋がると仮定した場合は、系統電力消費分から売電分を差し引いた正味排出量にシステムa,b間では大きな差は生じないが、システムa,b間では蓄電池の製造段階に差異があり、これが生じた原因として、蓄電池の利用効率の違いが考えられる。システムbでは、蓄電した余剰電力を一日の内に全てを利用せず夜間照明のみに対して利用することから放電深度が浅いことに対して、システムaでは、夜間の全負荷に対して利用することから毎日深放電を繰り返すシステムとなり、蓄電池の寿命年数が相対的に短くなる

ことが年間当たりの製造段階における排出量の増大に影響している。

次に同一システム内の蛍光灯・LED照明・LED照明2の比較を試みる。まず、システムiでは、蛍光灯システムが最も総排出量が大きい結果となり、次いで、LED照明2、LED照明システムの順となった。蛍光灯システムとLED照明システムでの差異は、売電量が大きく関与しており、売電量の差異には照明による消費電力の差が関連している。LED照明とLED照明2システムの差異はごく微小であるが、これは蓄電池製造段階の差である。LED照明2システムではLED照明システムよりも浅い放電深度で利用することが可能であり寿命を引き延ばすことが可能であるが、蓄電池規模が大きく、寿命を引き延ばすことによる製造段階の排出量の減少よりも、規模を大きくすることによる排出量の増加分の方が大きかったことが原因である。システムii-aおよびシステムii-bにおける差異も同様の理由が考えられるが、浅い放電深度で利用することが蓄電池の寿命を引き延ばす効果のほうが優位となりLED照明とLED照明2システムの総排出量はシステムiと逆の大小関係となった。

各々の都市で蓄電池の寿命は多少異なるが、設定条件（規模、余剰電力の利用用途）が同様であれば製造段階および廃棄段階に大きな差はないことから、都市間の比較では、系統電力使用段階と売電段階において大きな差が生じている。各都市のライフサイクルCO₂の大小関係については、総電力負荷、日射量、系統電力CO₂排出係数などにより影響されている。名古屋は他都市と比較して相対的に少ない総排出量となっているが、総負荷と系統電力CO₂排出係数が比較的小さいことに加えて、季節ごとの気象条件変動が大きいことにより、設定した蓄電容量（年間で負荷最大時を想定）からのギャップが大きい低負荷の時期における余剰電力の増加が排出削減に影響したことが考えられる。すなわち、気象条件の変動が著しければ年平均からみてやや過剰な設備規模となる可能性もある。

4.2 CO₂ペイバックタイム（CO₂PT）算定結果

CO₂ペイバックタイム（CO₂PT）とは、製造段階において発生する排出量が、どれだけの期間システムを稼働すると相殺できるかを表すものである。したがって、CO₂PTは排出量の絶対値を表す指標ではなく、汎用システムと比較した際の削減量と製造段階における排出量の関係を表す指標である。ライフサイクルCO₂と同様、売電した電力についてもCO₂削減効果を得られることとした上で算出を行っている。CO₂PTの算定式は以下の通りである。

$$\text{CO}_2\text{PT} [\text{年}] = \frac{\text{製造時総排出量} [\text{kg-CO}_2]}{\text{年間排出削減量} [\text{kg-CO}_2/\text{年}]}$$

ここで、製造時総排出量はPVシステムおよび蓄電池の製造に伴う排出量であり、年間排出削減量は汎用蛍光灯システム（PV、蓄電池とも無し）の年間排出量に対する正味の削減量（売電分を差し引いた系統電力使用に伴う年間排出量との差分、すなわち太陽光発電電力量に地域別の系統電力CO₂排出係数を乗じた値）である。表3にシステム別・都市別の算定結果を示す。いずれの都市においても、独立系直流LEDシステム（システムiおよびii）のCO₂PTは汎用PVシステムのCO₂PTよりもやや長くなっている。この理由としては、先に述べたように、独立系直流LEDシステムにおけるAC/DC変換ロスを回避する効果が十分には反映されていない（パワーコンディショナーの変換効率と蓄電池の充電効率がほぼ同等）ことに加えて、蓄電池の製造時排出量の回収期間の分がCO₂PTを若干増加させることが考えられる。汎用PVシステムのCO₂PTが同様のシステムに関する既往報告⁹⁾よりも若干短い値となっているが、系統電力のCO₂排出係数（既往文献⁹⁾では、平成14年度実績）と日射量設定の差が主たる要因と考えられる。独立系直流LEDシステムの中ではシステムiが最も短期間で回収することが可能である結果となった。また、システムiiではシステムa,b間に差異は生じていない。これは、システムa,bともに昼間の余剰電力が蓄電を通して

夜間に使用されることから、売電分を差し引いた系統電力使用に伴う年間排出量が等しいためである。一方で、都市により1.5年～2年程度のばらつきが生じている。都市間の差異に影響を及ぼす要素としては、系統電力CO₂排出係数の差異に加えて、蓄電池容量の違いから生じる製造段階での排出量の差異と放電深度による蓄電池の寿命、日射量の違いによるPVの発電電力の差異などが考えられる。

次に、ペイバックタイムと機器の耐用年数との比較を行う。PVに関してはシステムによらず一定寿命(PVモジュール：17年、パワーコンディショナー：10年)としているが、蓄電池の寿命予測(年)は2.23で述べた通り、利用状況(主に放電深度)によって利用可能なサイクル数を変動させたため、表4に示すように都市やシステムにより4～9年程度の範囲となっている。全ての都市およびシステムにおいて、PVモジュール、パワーコンディショナーおよび蓄電池の耐用年数以内にはシステム製造時のCO₂を回収できることがわかった。ただし、東京と大阪においてはii-a蛍光灯システム(蓄電電力を全負荷に使用)において蓄電池の寿命予測(年)とCO₂PTの差が1.4年程度という比較的短い結果になった。これは設備規模に対し削減効果が小さいことや、蓄電池を深放電で利用することによる耐用年数の低下が理由として考えられる。

表3 CO₂ペイバックタイム(CO₂PT, year)算定結果

	汎用PV		システム i			システム ii -a,b		
	蛍光灯	LED	蛍光灯	LED	LED2	蛍光灯	LED	LED2
札幌	1.44	1.32	1.59	1.44	1.45	1.81	1.70	1.66
仙台	1.75	1.60	1.96	1.77	1.78	2.10	1.95	1.91
東京	2.07	1.90	2.19	1.98	2.00	2.25	2.10	2.05
名古屋	1.76	1.63	2.02	1.84	1.85	2.22	2.10	2.04
大阪	1.80	1.67	2.13	1.94	1.95	2.30	2.16	2.10
広島	1.13	1.05	1.42	1.29	1.30	1.58	1.49	1.45
高松	1.32	1.22	1.52	1.37	1.38	1.66	1.56	1.52
福岡	1.64	1.51	1.93	1.75	1.76	2.14	2.00	1.95

表4 蓄電池の予測寿命年数(year)

	システム i			システム ii -a			システム ii -b		
	蛍光灯	LED	LED2	蛍光灯	LED	LED2	蛍光灯	LED	LED2
札幌	4.96	4.98	5.94	3.66	3.67	3.72	5.33	6.31	6.99
仙台	5.03	5.04	6.02	3.66	3.66	3.75	5.06	6.66	7.88
東京	5.04	5.05	6.03	3.66	3.66	4.00	4.07	5.81	7.21
名古屋	4.67	4.67	5.60	3.66	3.66	3.74	6.15	7.54	9.84
大阪	4.74	4.73	5.67	3.66	3.66	3.82	4.81	6.13	7.22
広島	4.96	4.93	5.91	3.66	3.66	3.73	4.32	5.21	5.72
高松	5.20	5.07	6.21	3.66	3.66	3.86	5.62	7.05	8.60
福岡	5.11	5.10	6.13	3.66	3.66	3.74	5.71	6.92	8.17

5. おわりに

太陽光発電と蓄電池を活用した独立系直流LED照明システムの環境負荷評価として、日本国内の8都市を対象として一般戸建て住宅（4人世帯）の電力消費由来CO₂排出削減量とCO₂ペイバックタイムを算定し、汎用システムおよび汎用PVシステムとの比較を行った。蓄電池の容量や蓄電電力の用途などの組み合わせにより複数のシステムで評価を試みたが、現状の技術においては、パワーコンディショナーの変換効率と蓄電池の充電効率がほぼ同等であることからAC/DC変換ロスを回避する効果は反映されず、独立系直流LED照明システムにおける削減率は蓄電池無しの汎用PVシステム（LED照明）における削減率を上回ることはなく、汎用蛍光灯（PV、蓄電池いずれも無し）システムに対する削減効果のほとんどはPV導入効果であることがわかった。ただし、実際の運用においては送電ロスや系統側の制約による買い取り制限の可能性も考慮すべきであり、売電制約が大きくなるほど削減率が小さくなることについても考慮する必要がある。独立系直流LED照明システムの中で最も排出量が少ないシステムは夜間照明分の蓄電容量のLED照明システムであった。蓄電容量について昼間の余剰電力全てを蓄電できるまで増やしたシステムにおいては、蓄電した電力を一夜の内に全てを利用せず夜間照明のみに対して利用する際は放電深度が浅いことに対して、夜間の全負荷に対して蓄電電力を利用する際は毎日深放電を繰り返すシステムとなり、蓄電池の寿命年数が相対的に短くなることが年間当たりの製造段階における排出量の増大に影響していた。CO₂ペイバックタイムの観点では、独立系直流LEDシステムは汎用PVシステムと比較して蓄電池の製造時排出量の回収期間の分やや長くなったが、設定された蓄電池容量の違いから生じる製造段階での排出量やPVの発電電力の差異により対象都市で違いが見られた。全ての都市およびシステムにおいて、システム全体の耐用年数以内には回収できることがわかったが、設備規模に対し削減効果が小さい場合は耐用年数と回収年数の差は小さくなり、蓄電池を深放電で利用することによる耐用年数の低下も耐用年数と回収年数の差に影響していた。

本研究では、設備規模および利用方法に関して様々なシステムを想定し、それぞれのシステムにおいて環境面の評価を試みた。しかし、実際の利用において考えられる全ての利用方法を評価することはなかったため、これらを考慮に入れたより緻密なシミュレーションを行うことが今後の課題である。また、本研究では戸建住宅（4人世帯）を対象として評価を行ったが、集合住宅や賃貸オフィス、産業分野など、電力の安定供給の価値が比較的高いと予想される建築物を対象に電力需要規模の違いも顧慮しながら評価を行うことも必要である。さらには、逆潮流を行った際は

全ての電力が損失なく全て利用されるとの仮定で評価を行ったが、対象建築物の周辺の需要によっては送電ロスなどの損失が生じる場合があることに加えて、系統電力側の制約により買い取り制限の可能性もあるため、売電分の全てが環境負荷削減に繋がるとは一概には言えないことも考慮しなければならない。さらには、気象条件の変動が著しければ年平均からみてPVや蓄電池が過剰な設備規模となり、売電量が増えることによる排出削減量は増える一方で設備の導入費用が過大となる可能性もあり、実際に導入する際の評価として費用対効果を精査することが肝要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費（課題番号：15K06277）を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

（平成29年4月10日受付、平成29年8月29日採択）

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁, 平成27年度エネルギーに関する年次報告 (第1章 国内エネルギー動向) 第2部 エネルギー動向, 経済産業省資源エネルギー庁ホームページ, 入手先 <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2016pdf/whitepaper2016pdf_2_1.pdf>, (参照 2017-3-12)
- 2) 田畑智博 (2012): 環境科学会誌, 25(5), 367-377
- 3) 経済産業省東北経済産業局, ~ 低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業 ~ 直流技術による低炭素社会システムとしての新・地産地消エネルギーインフラの構築 事業報告書 概要版, 経済産業省東北経済産業局ホームページ, 入手先 <http://www.tohoku.meti.go.jp/s_shigen_ene/topics/pdf/seika2.pdf>, (参照 2017-3-12)
- 4) 日本経済新聞社 (2011): 日経アーキテクチュア, 2011年6月10日号, 35-37
- 5) 日本経済新聞社 (2016): 日経エネルギー Next, 2016年8月号, 22-23
- 6) 資源協会 (1994): 家庭生活のライフサイクルエネルギー, あんほるめ, 東京, 407pp.
- 7) 株式会社カネデン, JIS照度基準表, アカリセンターホームページ, 入手先 <<http://www.akaricenter.com/mame/pdf/jis-shoudo.pdf>>, (参照 2017-3-12)
- 8) 株式会社エジソンパワー, リチウムイオン電池のサイクル特性, 株式会社エジソンパワーホームページ, 入手先 <<http://www.edisonpower.co.jp/lithium/>>, (参照 2017-3-12)
- 9) みずほ情報総研 (2009): 太陽光発電システムのライフ

- サイクル評価に関する調査研究, 平成19～20年度新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 報告書, No.20090000000073, 264pp.
- 10) Sullivan J.L., Gaines L.(2012): Energy Conversion and management, 58, 134-148
- 11) 京セラ株式会社. 発電電力量, 京セラ株式会社ホームページ, 入手先 <<http://www.kyocera.co.jp/solar/pvh/about/simuinfor/index.html>>, (参照 2017-3-12)
- 12) 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 年間時別日射量データベース (METPV-11), NEDOホームページ, 入手先 <<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>>, (参照 2017-3-12)
- 13) 総務省統計局, 平成23年社会生活基本調査, 総務省ホームページ, 入手先, <<http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/index.htm>>, (参照 2017-3-12)
- 14) 株式会社三菱総合研究所, 平成24年度エネルギー消費状況調査 (民生部門エネルギー消費実態調査) 報告書, 経済産業省ホームページ, 入手先 <http://www.meti.go.jp/medi_lib/report/2013fy/E003078.pdf>, (参照 2017-3-12)
- 15) 総務省統計局, 家計調査, 総務省統計局ホームページ, 入手先 <<http://www.stat.go.jp/data/kakei/>>, (参照 2017-3-12)
- 16) 環境省, 報道発表資料 平成24年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等 (一部追加・修正) の公表について, 環境省ホームページ, 入手先 <<http://www.env.go.jp/press/17512.html>>, (参照 2017-3-12)
- 17) カーボンフットプリント・コミュニケーションプログラム (CFPプログラム), CFP算定用二次データ, CFPプログラムホームページ, 入手先 <<http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/data.html>>, (参照 2017-3-12)

[Case Study Research Article]

CO₂ Payback Time and Reduction Effect of CO₂ Emission Originated from Electricity of Detached Household by Introducing DC LED Lighting System Utilizing Photovoltaic Power Generation and Storage Battery

Koji AMANO^{1,*}, Yoshihiro DOI², Daisuke FUKUHARA²,
Naoki YOSHIKAWA¹ and Koji SHIMADA³

1 College of science and engineering, Ritsumeikan University;
2 Graduate course of science and engineering, Ritsumeikan University;
3 College of economics, Ritsumeikan University

*Corresponding author: amano@se.ritsumei.ac.jp

Synopsis: This study evaluated the lifecycle reduction potential and the payback time of CO₂ originated from general detached household electricity consumption by introducing the DC LED lighting system utilizing photovoltaic power generation and storage battery. Among various DC LED lighting systems, the system with storage battery capacity adjusted to night lighting power demand showed relatively high CO₂ reduction potential. In the system with storage battery capacity extended to whole daytime surplus power generation, shortening of battery lifetime caused by repeated complete discharge should affect lifecycle CO₂ increase of the system. The CO₂ payback time of DC LED lighting system varied between 1.5 and 2 years according as several regional characteristics such as electrical grid CO₂ emission factor, photovoltaic power condition and storage battery lifetime related to the required capacity.

Keywords: Lifecycle CO₂; CO₂ payback time; DC LED lighting system; photovoltaic power generation; lithium ion battery