



太陽光発電システム搭載自動車検討委員会  
中間報告書（3）

「太陽光発電システム搭載自動車の実証走行と  
実用化に向けた取り組み」



2023年2月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

## 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書（3） 目次

第1章 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向	1
1.1 太陽光発電システム搭載自動車の市場化等の動向	1
1.1.1 乗用車への太陽光発電搭載	1
1.1.2 乗用車以外の太陽光発電システム搭載自動車	3
1.2 太陽光発電システム搭載自動車実用化に向けた NEDO の取り組み	4
【第1章 参考文献】	6
第2章 太陽光発電システム搭載自動車の実証走行：得られた知見と今後の課題	7
2.1 プラグインハイブリッド自動車への太陽光発電システムの搭載 ：CO <sub>2</sub> 排出量の削減と充電頻度の低減	7
2.1.1 実証試験の目的と車両諸元	7
2.1.2 CO <sub>2</sub> 排出量の削減効果（シミュレーション）	8
2.1.3 公道実証実験：発電電力量と走行可能距離	9
2.1.4 今後の展望と課題	10
2.2 電気自動車への太陽光発電システムの搭載 ：発電電力量と充電頻度削減効果、日射変動に対する性能の評価	11
2.2.1 実証試験の目的と車両諸元	11
2.2.2 発電量と走行可能距離、充電頻度削減の実力把握	12
2.2.3 日射変動に対する性能評価	16
2.2.4 今後の課題と展望	21
【第2章 参考文献】	22
第3章 太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組み	23
3.1 周辺環境の日射量や発電量への影響	23
3.1.1 自動車周辺の日影を作る建物などの分布	24
3.1.2 日影分布に伴う日射強度モデルの検証	25
3.1.3 部分日影源の方位、仰角分布の測定、および発電量への影響	26
3.1.4 周辺環境毎の自動車屋根面の日射量	26
3.1.4 課題と展望（周辺環境の日射量や発電量への影響）	27
3.2 車体形状の統計的把握と発電量への影響	29
3.2.1 車体形状把握の必要性	29
3.2.2 車体形状の統計的把握方法	29
3.2.3 太陽電池の搭載能力調査結果	29
3.2.4 課題と展望（車体形状の統計的把握と発電量への影響）	31
3.3 曲面モジュールの実証	32
3.3.1 曲面モジュールの試作	32
3.3.2 試作した曲面モジュールの発電性能	32

3.3.3	自動車ルーフ設置時の温度変化	33
3.3.4	課題と展望	34
3.4	地上用太陽電池に関する規格と自動車規格との比較	35
3.4.1	比較を行った規格	35
3.4.2	地上用太陽電池と自動車部品に関する規格の比較結果	36
3.4.3	課題と展望	39
	<b>【第3章 参考文献】</b>	40
第4章	まとめ	41
4.1	得られた知見	41
4.1.1	太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向	41
4.1.2	太陽光発電システム搭載自動車の実証走行	41
4.1.3	太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組み	42
4.2	今後の展望と課題	43
4.3	今後の取り組みについて	44
	<b>【第4章 参考文献】</b>	45
	「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」	46

## はじめに

2050年のカーボンニュートラルに向け、運輸部門へのニーズは大きく、中でも自動車部門における取り組みが非常に重要となる。自動車からの温室効果ガスの排出削減に向け、世界各国で車両の電動化を加速する取り組みが始まっているが、これらの自動車も、再生可能エネルギー由来のクリーンな電力を供給することができなければ、温室効果ガス排出量削減効果は限定的となる。

現在、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの加速度的な導入により、発電部門における温室効果ガスの排出削減が進む一方で、そのエネルギー需要の大部分を化石燃料に頼っている運輸部門にとって、現状の温室効果ガス削減目標を上回る削減を達成するためには、革新的な技術開発が不可欠である。

こうした状況をふまえ、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）は、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会（事務局：みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)（旧、みずほ情報総研(株)）を設置し、高効率の太陽電池を自動車に搭載することにより期待される効果、実現に向けて取り組むべき課題を検討してきており、2018年1月に運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量削減に貢献できる可能性などを示した<sup>i</sup>。また、自動車に搭載した太陽電池が受光・取得可能な日射量や発電電力量は建物の屋根・屋上などとは異なるため、定量的な評価が必要であることから、日本国内の二つの地点（北海道および宮崎県）において自動車の取得日射量の計測を試行し、2019年4月にその結果を取りまとめた<sup>ii</sup>。

これらの取り組みと並行し、NEDOでは、NEDO事業により開発した革新的で高性能な太陽電池（超高効率太陽電池）を搭載した太陽光発電システム搭載自動車の公道実証走行を2019年より開始しており<sup>iii,iv</sup>、これまでに様々な成果が得られ、また、実用化に向けた課題の抽出、解決策の検討を継続的に行っている。さらに、太陽光発電システム搭載自動車の本格的実用化の基盤となる様々な技術開発も実施している。

本報告書は、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会において、太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向を概観するとともに、定格出力1kW規模の超高効率太陽電池を搭載した太陽光発電システム搭載自動車の公道実証走行により得られている主要な成果、ならびに、今後の本格的実用化に向けた基盤となる技術に係る取り組み状況を取りまとめたものである。

---

<sup>i</sup> NEDO：「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書」（2018年1月）  
(<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>)

<sup>ii</sup> NEDO：「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書（2）「太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量に関する予備的検討」」（2019年4月）  
(<https://www.nedo.go.jp/content/100892361.pdf>)

<sup>iii</sup> NEDO：ニュースリリース「世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始」（2019年7月4日）([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101150.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101150.html))

<sup>iv</sup> NEDO：ニュースリリース「世界最高水準の高効率な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池パネルを製作」（2020年7月6日）([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101326.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101326.html))

## 第 1 章 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向

近年、世界中の国々が CO<sub>2</sub> 排出量低減への取り組みを強化している。自動車業界全体でも、脱炭素化への取り組みに注力している。自動車の世界生産台数は、2000 年代初頭は約 6,000 万台であったが、2010 年代後半には 9,000 万台以上に増加している。また、全世界の自動車保有台数は 2018 年に 14 億台を超えた。今後も、新興国の経済発展などに伴い、年間生産台数および保有台数ともに増加していくことが予想されている<sup>1</sup>。

自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量低減のため、ハイブリット車 (Hybrid electric vehicle : HEV と略す)、プラグインハイブリット車 (Plug-in hybrid vehicle : PHEV と略す)、燃料電池車 (Fuel cell vehicle : FCEV と略す)、電気自動車 (Battery electric vehicle : BEV と略す) など多くの環境対応 (電動) 車の開発が各社で加速されている。

一方、輸送分野以外に目を向けると、例えば、住宅、電力分野では、CO<sub>2</sub> 排出削減の取り組みの有望な対策として太陽光をはじめとする再生可能エネルギー利用が進められている。現在では、多くの国で再生可能エネルギーが最も安価な電源となり、その重要性がますます高まっている。

太陽光発電システムを電気自動車 (プラグインハイブリッド自動車含む) に搭載し、その発電電力を車両の走行に利用することにより、系統電力の外部からの充電と比較した CO<sub>2</sub> 排出の削減、外部からの充電頻度の低減などの効果が期待される<sup>2</sup>。そして、自動車の電動化の促進に向けた世界的な動きとも相俟って、搭載する太陽光発電出力は大きくはないものの、太陽光発電システム搭載自動車は、徐々にではあるが、市場化に向けた動きが見られ始めている。また、太陽光発電性能の向上も含め、太陽光発電システム搭載自動車の本格的実用化に向けた技術開発等も実施されている。

ここでは、太陽光発電システム搭載自動車の市場化等の動向、ならびに太陽光発電システム搭載自動車の開発・実用化に向けた NEDO による取り組みの概略を示す。

### 1.1 太陽光発電システム搭載自動車の市場化等の動向

#### 1.1.1 乗用車への太陽光発電搭載

太陽電池の自動車への搭載は、古くは 1980 年代に提案され、1990 年代初頭に始まった。1991 年に発売されたマツダ・センティアや 1993 年に発売された Audi A6 にてサンルーフに太陽電池が搭載された。搭載された太陽電池の定格出力は数十 W で、太陽電池の発電電力は、ファンを駆動して室内を換気するシステムに利用された。2009 年に発売された第 3 世代プリウスにも同様の太陽光発電システムが搭載された。翌年発売された日産リーフでは、搭載された太陽電池による補器 (12V) バッテリーの充電が実現した。しかし、車載された太陽電池の発電電力で走行する自動車は最近まで販売されていなかった。その後、米国フォード社による太陽電池を電動車両のエネルギー源とするコンセプトカーの発表 (2014 年 1 月) 後、さまざまな自動車会社が太陽電池を動力源として電動車両を動かす可能性の検討を始めた。

表 1.1-1 には、現在市販されている、および販売開始が予定されている、太陽光発電電力を駆動源に利用する太陽光発電システムを搭載している乗用車の例を示す。

表 1.1-1 太陽光発電電力を駆動源に利用する太陽光発電システム搭載自動車（乗用車）の例

自動車名称 (メーカー)	カテゴリ	太陽電池 容量(W)	バッテリー 容量(kWh)	車両重量 (kg)	電費 (km/kWh)	航続可能 距離 (km)	発売開始年 (予定含む) *2
Prius <sup>3</sup> (Toyota)	PHEV	180 W <sup>4</sup>	8.8	1,510	—	—	2017 年
Karma Revero <sup>5</sup> (Karma)	PHEV	200 W	28	2,688	—	—	2017 年
Sonata <sup>6</sup> (Hyundai)	HEV	205 W	—	1,584 ~1,595	—	—	2020 年
bz4x <sup>7</sup> (Toyota)	BEV	225 W	71.4	2,195 ~2,285	6.8~8.8	540~559	2022 年
IONIQ 5 <sup>8</sup> (Hyundai)	BEV	205 W	58~72.6	1,870 ~2,100	7.0~7.6	498~618	2022 年
Sion <sup>9</sup> (Sono Motors)	BEV	1,200 W	54	1,730	6.3	305	2022 年
Lightyear 0 <sup>10</sup> (Lightyear)	BEV	1,075 W (5 m <sup>2</sup> )	60	1,575	9.3~10.4*1	560~625	2022 年
Fisker OCEAN <sup>11</sup> (Fisker)	BEV	—	100	1,815	4.0~5.6*1	400~560	2022 年
Cybertruck <sup>12</sup> (Tesla)	BEV	—	—	—	—	—	2023 年
Vision EQXX <sup>13</sup> (Mercedes)	BEV	—	100	1,755	11.5	1,000~	—

\*1: 航続可能距離 (km) ÷ バッテリー容量 (kWh) にて算出、\*2: 2022 年 9 月時点

車載太陽電池で駆動用の高電圧バッテリーを充電するシステムは、2017 年に販売開始したプリウス PHEV において、世界で初めて量産化された。プリウス PHEV には、出力 180 W の結晶シリコン太陽電池がオプション搭載されており、太陽電池のみで駆動する自動車ではないが、太陽電池の発電電力による航続距離は最大 6.1 km/日と計算されている。その後、2017 年に Karma Revero（定格出力 200 W）、2020 年に現代自動車の Sonata HEV など、車載太陽電池の発電による走行を可能としたモデルが発売されている。Sonata HEV はシャシーラーフに 205 W の LG 製太陽電池モジュールを搭載し（同車種の最上位モデルのみ搭載）、このモジュールは 46 セルによって構成され、表面には曲面ガラスを採用している。太陽電池が発電した電力を直接駆動用バッテリーに充電するシステムで、バッファ用のサブバッテリーに充電するプリウス PHEV とは異なるシステムを採用している。

2022 年以降の動向を見ると、搭載される太陽電池モジュール容量が大きくなり、市場製品のバリエーションも多様化する傾向にある。

トヨタ自動車は SUV タイプの BEV である bz4x を 2022 年より販売を開始し、オプションとして、太陽光発電による充電システム（ソーラー充電システム）を搭載することが可能である。同車種は駆動用電池と補機バッテリーを搭載しており、駐車中は駆動用電池を充電し、走行中は補機バッテリーシステムの消費を補うことで走行距離の向上に貢献するとしている<sup>7</sup>。

Hyundai は IONIQ 5 (BEV) を発売予定であり、Sonata と同型の太陽電池モジュールを搭載する予定である<sup>6</sup>。また、Hyundai は韓国の Kia Motors（起亜自動車）と連携して車載型太陽電池の研究

究開発を行っており、現段階の屋根面に結晶シリコン型太陽電池を搭載する「Silicone-type Solar Roof」を 1<sup>st</sup> generation、屋根面に透過型太陽電池を搭載する「Translucent Solar Roof」を 2<sup>nd</sup> generation、ボンネットおよび屋根面全体に搭載する「Solar Lid」を 3<sup>rd</sup> generation として、開発する計画を発表している<sup>14</sup>。

欧州では、ドイツのベンチャー企業である Sono Motors が Sion、オランダのベンチャー企業である Lightyear が Lightyear 0 を発売予定としている。いずれも BEV で、Sono Motors の Sion はシャシー上面だけではなく、側面・背面にもセルを具備し、1.2 kW (1,200 W) の太陽電池搭載を可能としている(図 1.1-1)<sup>9</sup>。また、太陽電池カバーは従来のガラスではなく、耐擦性・軽量性に優れたポリマーを採用している。一方、Lightyear 0 はボンネットからシャシー上部の全てに太陽電池セルを搭載し、1 kW の容量を達成している(図 1.1-2)<sup>10</sup>。

また、2023 年以降に太陽電池を搭載した自動車を市販化する計画も発表されており、米国の Tesla やドイツの Mercedes が積極的に開発を進めている状況にある。



図 1.1-1 太陽光発電システム搭載自動車例(1)  
Sono Motors - Sion<sup>9</sup>



図 1.1-2 太陽光発電システム搭載自動車例(2)  
Lightyear – Lightyear 0<sup>10</sup>

### 1.1.2 乗用車以外の太陽光発電システム搭載自動車

太陽光発電システムを搭載する自動車への取り組みは、乗用車以外にも広まりつつある。

#### (1) トラック・トレーラーへの太陽光発電搭載

物流大手 DHL からスピンアウトした英国 Trailer 社は薄膜太陽電池をトレーラーの屋根に搭載し、車両の燃料消費を抑えるシステムを開発し、実用化している。このシステムはトラック、トレーラー、バス、ゴミ収集車等に幅広く適用が可能である。薄膜太陽電池を搭載するメリットとして、モジュールが薄いため、本電池の設置による車両の再登録が不要となることが挙げられている。現在、本システムを搭載する顧客は DHL 以外にも、英国 Loyal Mail、Go-Ahead Group、シンガポールの ALBA Group でも採用が広がっている<sup>15</sup>。

オランダの IM Efficiency でも、箱型トレーラーの屋根に太陽電池を設置する取り組みを展開している<sup>16</sup>。設置する太陽電池は現状、結晶 Si モジュールで、トレーラー屋根への設置に加え、側面への設置可能性や効果についても検討を行っている。

トラックへの太陽光発電利用は日本でも取り組みが始まっており、ナガサキロジスティクス(株)は、10t 冷凍車の箱の上に太陽電池モジュールを搭載する実証実験に車両を提供した。薄膜太陽電池を搭載し、燃費が 5%以上向上するとしている<sup>17</sup>。



また、みずほリース株式会社と丸紅株式会社が共同で出資する米国の冷凍・冷蔵トレーラーリース・レンタル会社である PLM Fleet では、Advanced Energy Machines の設計・製造を行う冷蔵・冷凍ユニットを備えたトレーラーに、太陽電池モジュールと蓄電池システムを搭載し、2020 年 12 月より納入を開始している<sup>18</sup>。太陽電池で発電された電力は、トレーラー下部に設置された蓄電池システムに給電され、冷凍・冷蔵トレーラー用のみに使用される。この取り組みの背景として、米国ではカリフォルニア州を中心にゼロ・エミッション化への取り組みが進められており、ディーゼルエンジンを使用するトレーラー等のハイブリッド化・電化に注目が高まっていることがある。

トラックの電化とあわせた取り組みは研究機関においても進められており、ドイツの Fraunhofer ISE は太陽電池モジュールを搭載した貨物輸送・電動トラックの実証試験を実施している<sup>19</sup>。実証用貨物輸送・電動トラックに 3.5 kW の太陽電池モジュール、800 V の高圧バッテリーを搭載しており、トラックの使用エネルギーの 5~10%を充足できるとされている<sup>20</sup>。

## (2) 小型車両への太陽光発電搭載

一般乗用車やトラック・トレーラー以外の小型車でも太陽電池を搭載する動きは広まっている。

米国のベンチャー企業である Aptera Motors は太陽電池を搭載し、太陽電池の電力だけでも走行可能な三輪 BEV である Aptera を開発し、2023 年より本格生産を開始する予定である。空力性能、および転がり抵抗の低減を追求した設計により、バッテリー容量が 100 kWh のモデルは 1,000 km の航続距離があるとし<sup>21</sup>、また、三輪 BEV であるため、自動車ではなくモーターサイクルに分類されることから、安全規格面での基準を満たすことが比較的容易としている<sup>22</sup>。

また、オランダの Squadmobility 社は、太陽電池をシャシー屋根面に搭載した軽四輪車を 2022 年中に販売する予定である。こちらも自動車ではなく、軽量四輪車カテゴリ (L6e) に属され、最高時速は 45 km/h 程度と、次世代モビリティの一種として注目を集めている<sup>23</sup>。

## 1.2 太陽光発電システム搭載自動車実用化に向けた NEDO の取り組み

定格出力 200 W 前後の太陽光発電を搭載する乗用車は、徐々にではあるが、市場化され、車種も増えつつある。太陽光発電システム搭載自動車は、太陽光発電電力を駆動エネルギーとして利用することで、外部からの充電頻度を低減し、充電電力の CO<sub>2</sub> 排出量が大きい場合には、CO<sub>2</sub> 排出量の削減にも貢献することができる。これらの効果は、搭載する太陽光発電の性能強化、すなわち、搭載する太陽光発電の出力を大きくすることにより、高まることが期待される。このような観点から、発電効率の高い太陽電池をより多くの面積に設置することにより、太陽光発電出力を高め、走行環境や条件によっては太陽光発電電力のみによる走行も可能とすることを目指した取り組みも実施されている。

欧州のベンチャー企業、Sono Motors や Lightyear による取り組み (前述) もその例であるが、日本においても、NEDO が中心となり、トヨタ自動車(株)、日産自動車(株)、シャープ(株)との協力による、太陽光発電システム搭載自動車が、それぞれ 2019 年度、2020 年度に開発された (図 1.2-1~2)。これらの実証車は、発電効率 30%を越える超高効率太陽電池を搭載し、現在も公道における実証走行が実施されている。太陽光発電自体の発電性能に加え、自動車駆動用電源としての本格利用に向けた様々なデータを取得しており、本報告書の第 2 章では、一部ではあるが、これまでに得られた知見の概略を取り纏めている。





図 1.2-1 太陽光発電システム搭載自動車実証車両 (1) : プリウスプラグインハイブリッド (トヨタ自動車株) <sup>24</sup>



図 1.2-2 太陽光発電システム搭載自動車実証車両 (2) : eNV200 (日産自動車株) <sup>25</sup>

また、NEDO では、太陽光発電システム搭載自動車の実証試験に加え、自動車等の移動体への搭載を意図した低コスト・高性能な太陽電池の実用化に向けた研究開発を 2020 年度より実施している (表 1.2-1)。これらの研究開発は太陽電池メーカーが中心となり、他の参画企業、研究機関、大学との連携により進められている。加えて、このような技術開発を加速するため、国内外における研究開発、市場動向を調査・分析するとともに今後の方向性を議論する動向調査も実施している。同様に成果の一部とはなるが、本報告書の第 3 章では、研究開発や動向調査によってこれまでに得られている成果の概略を収録している。

表 1.2-1 NEDO が実施している移動体太陽電池の研究開発および動向調査<sup>26</sup>

「移動体用太陽電池の研究開発／超効率モジュール技術開発」	太陽の照射方向に対し追尾が不要で、かつ AM1.5 でモジュール効率 35%以上を達成可能な太陽電池 (多接合 III-V 化合物太陽電池、III-V/Si、III-V/CIS などのタンデム型太陽電池など) の高効率化技術、低コスト化技術、新型セル、モジュール構造、自動車搭載モジュール化技術などを開発する。
「移動体用太陽電池の研究開発／次世代モジュール技術開発」	結晶シリコンを基盤とした低コストで変換効率 30%以上かつ曲面追従性を持つモジュールを開発する。例えば、ペロブスカイト/Si 等のタンデム化技術や 3D 曲面モジュール化技術などを開発する。
「移動体用太陽電池の動向調査」	IEA PVPS Task17 (PV and Transport) 等の活動に参画し、電動自動車等の移動体への搭載を目指した太陽電池の国内外における研究開発、市場動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論し、移動体分野の研究開発を加速する。

なお、動向調査の一環として実施、参加している「IEA PVPS Task17 : PV and Transport」(IEA PVPS : International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme) は、日本が幹事国 (議長) となり推進している IEA 傘下の国際協力プロジェクトである。2021 年には、太陽光発電システム搭載自動車の動向や実用化により期待される効果分析等を行い、技術報告書を作成した<sup>27</sup>。IEA PVPS ウェブサイトより公開されており、適宜ご参照いただきたい。

## 【第 1 章 参考文献】

- <sup>1</sup> IEA : Tracking Transport 2020 (2020) (<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>)
- <sup>2</sup> NEDO : 「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書」 (2018 年 1 月)  
(<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>)
- <sup>3</sup> トヨタ自動車株式会社 : ニュースリリース「TOYOTA、プリウス PHV をフルモデルチェンジ」 (2017 年 2 月 15 日) (<https://global.toyota.jp/newsroom/toyota/21821789.html>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>4</sup> パナソニックホールディングス株式会社 : プレスリリース「新開発の HIT 車載タイプがトヨタ自動車の「新型プリウス PHV」に搭載」 (2017 年 2 月 28 日)  
(<https://news.panasonic.com/jp/press/jn170228-2>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>5</sup> Karma Automotive 「Revero」 ホームページ  
(<https://www.karmaautomotive.com/karmab2c/en/configure/selectmodel>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>6</sup> 米国現代自動車ホームページ  
(<https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/sonata-hybrid/compare-specs>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>7</sup> トヨタ自動車株式会社「bz4x」 Web カタログ  
([https://toyota.jp/pages/contents/request/webcatalog/bz4x/bz4x\\_main\\_202206.pdf](https://toyota.jp/pages/contents/request/webcatalog/bz4x/bz4x_main_202206.pdf)) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>8</sup> 英国現代自動車ホームページ (<https://www.hyundai.com/uk/ioniq-5/ioniq5/specifications.html#>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>9</sup> Sono Motors 「Sion」 ホームページ (<https://sonomotors.com/en/sion/>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>10</sup> Lightyear 「Lightyear 0」 ホームページ (<https://lightyear.one/lightyear-0>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>11</sup> Fisker Inc. 「Fisker Ocean」 ホームページ (<https://www.fiskerinc.com/ocean>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>12</sup> Tesla 「Cybertruck」 ホームページ ([https://www.tesla.com/ja\\_jp/cybertruck](https://www.tesla.com/ja_jp/cybertruck)) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>13</sup> Mercedes-Benz 「Vision EQXX」 ホームページ ([https://media.mercedes-benz.com/vision\\_eqxx](https://media.mercedes-benz.com/vision_eqxx)) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>14</sup> 現代自動車グループウェブページ (<https://tech.hyundaimotorgroup.com/article/what-does-a-solar-roof-do-my-car-roof-generates-energy/>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>15</sup> Trailer ウェブページ (<https://www.trailer.co.uk/products>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>16</sup> IM Efficiency ホームページ (<https://imefficiency.com/>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>17</sup> ナガサキロジスティクス(株)ウェブページ (<https://nagalogi.co.jp/info/4727840>) (2022 年 8 月 30 日)  
(2022 年 11 月 29 日確認)
- <sup>18</sup> みずほリース株式会社、丸紅株式会社 : プレスリリース「米国トレーラーリース・レンタル事業におけるゼロ・エミッションの冷凍・冷蔵トレーラーの納入について」 (2021 年 2 月 5 日)
- <sup>19</sup> Fraunhofer ISE : Lade-PV – Development of Vehicle-Integrated Photovoltaics for On-Board Charging of Electric Utility Vehicles
- <sup>20</sup> STROM-FORSCHUNG : E-truck runs on solar energy from its own vehicle roof (2021 年 11 月 11 日公開、2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>21</sup> Aptera Motors ウェブページ (<https://www.aptera.us/about>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>22</sup> Aptera Motors ウェブページ (FAQ <https://www.aptera.us/faq>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>23</sup> Squadmobility ウェブページ (<https://squadmobility.com/>, <https://www.squadmobility.com/#specs>) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>24</sup> NEDO : ニュースリリース「世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始」 (2019 年 7 月 4 日) ([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101150.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101150.html)) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>25</sup> NEDO : ニュースリリース「世界最高水準の高効率な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池パネルを製作」 (2020 年 7 月 6 日) ([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101326.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101326.html)) (2022 年 10 月 4 日確認)
- <sup>26</sup> NEDO : 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」基本計画 (2022 年 3 月改訂)
- <sup>27</sup> IEA PVPS Task17 : State-of-the-Art and Expected Benefits of PV-Powered Vehicles, Report IEA-PVPS T17-01: 2021 (<https://iea-pvps.org/key-topics/state-of-the-art-and-expected-benefits-of-pv-powered-vehicles/>)

## 第2章 太陽光発電システム搭載自動車の実証走行：得られた知見と今後の課題

運輸部門からの CO<sub>2</sub> 排出量は全世界の排出の約 21%を占め、その中の約 39%が乗用車からの排出と報告されており<sup>1</sup>、CO<sub>2</sub> 排出量低減のため、世界各社で環境対応（電動）車の開発が加速されている。プラグインハイブリッド自動車（PHEV）や電気自動車（BEV）のように大容量の蓄電池が搭載された車両（電動車）は再生可能エネルギーとの相性が良く、中でも太陽電池は構造が板状のため、車載に適している。しかし、輸送分野における太陽エネルギー応用（太陽電池車載による走行）は、多くの研究が報告されているものの量産車のレベルでは、一部の電動車において利用が始まった発展途上の状況である。

このような中、電動乗用車に太陽電池を搭載し、駆動用電源として利用（太陽光発電が車両走行の電力を供給）していくための実証プロジェクト（実証車両の開発と、開発車両の公道における実証走行）が、NEDO が実施する技術開発プロジェクトと自動車メーカー（トヨタ自動車㈱、日産自動車㈱）の協力により実施されている。

ここでは、太陽光発電を搭載した PHEV および BEV の実証走行によりこれまでに得られた主要な知見と今後の課題を概説する。

### 2.1 プラグインハイブリッド自動車への太陽光発電システムの搭載：CO<sub>2</sub> 排出量の削減と充電頻度の低減

#### 2.1.1 実証試験の目的と車両諸元

トヨタ自動車㈱では、NEDO、シャープ㈱と共同で、市販のプリウス PHEV（バッテリー容量 8.8 kWh）のルーフやフード、バックドアなどに変換効率が 30%を超える III-V 族化合物 3 接合型太陽電池を搭載し、定格発電電力を約 860 W まで高めた実証車を製作した（図 2.1-1）。実証を用いて、2019 年 7 月から、車載太陽光発電による走行距離や充電回数の低減効果を明らかにすることを目的に、公道走行実証を愛知県内で実施した。

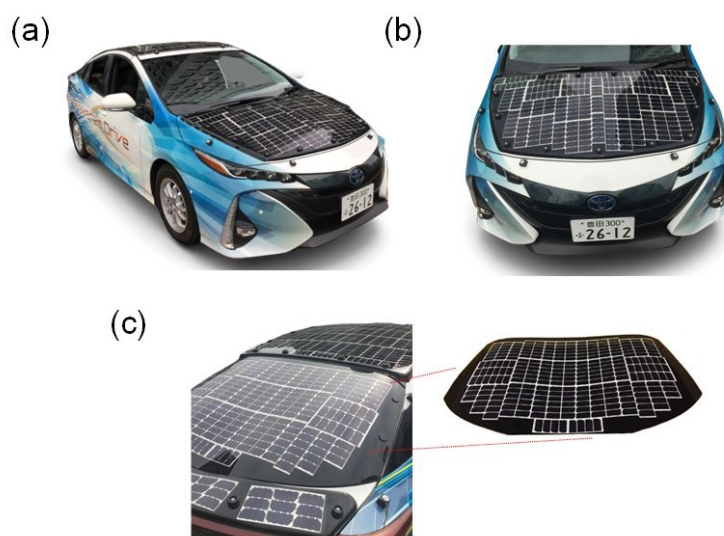


図 2.1-1 太陽光発電を搭載した PHEV 実証車

## 2.1.2 CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果（シミュレーション）

搭載した太陽電池の発電電力を走行に利用（走行に必要な充電電力を太陽光発電電力が代替）することにより、CO<sub>2</sub> 排出量の削減が期待される。ここでは、実証走行に先立ち実施した、乗用車への太陽光発電搭載により期待される CO<sub>2</sub> 排出量削減効果のシミュレーション結果を紹介する（図 2.1-2）。

日本各地のドライバー5,000 名から、年間走行データとその車の走行した場所周辺の気象データを取得し、太陽電池による発電でどの程度の距離が走行できたかのシミュレーションを行った。この解析では、太陽光の当たらない場所に駐車されている車両、例えば、屋内駐車場を定常的に利用している車両は、太陽電池での走行はゼロとし、可能な限り現実にもった条件での解析を行った。

試算の前提となる条件として、乗用車に搭載する太陽電池の定格出力 1 kW（効率 20%のモジュールであれば 5 m<sup>2</sup>）、太陽光発電からバッテリーまでの充電効率 74%、充電コントロールシステム（ECS）の消費電力 120 Wh/日、車両走行電力消費 10 km/kWh、蓄電池容量 4 kWh（PHEV を想定）とした<sup>2</sup>。

そして、シミュレーションにより、全走行距離の約 30%を太陽エネルギーで賄うこと（CO<sub>2</sub> 排出量の削減）が可能であるという結果が得られた。乗用車からの CO<sub>2</sub> 排出量は世界全体の CO<sub>2</sub> 排出量の約 1 割を占めており、太陽電池を搭載することで大きな CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が見込めることが示された。また、このシミュレーション解析から、太陽電池を搭載することで、約 40%の車両が外部からの充電を一度もすることなく走行できる可能性があることが分かった<sup>2</sup>。

また、NEDO が行った計算では、蓄電池容量を 40 kWh、車両の走行エネルギー消費率を 12.5 km/kWhに向上することで、日本国内の約 70%の乗用車が太陽エネルギーのみで走行が可能となると報告されている<sup>3</sup>。

このように、乗用車に太陽電池を搭載することで、CO<sub>2</sub> 排出量の大きな削減だけでなく、充電回数低減ができるなど、電動車の利便性の向上に大きな効果があると言える。

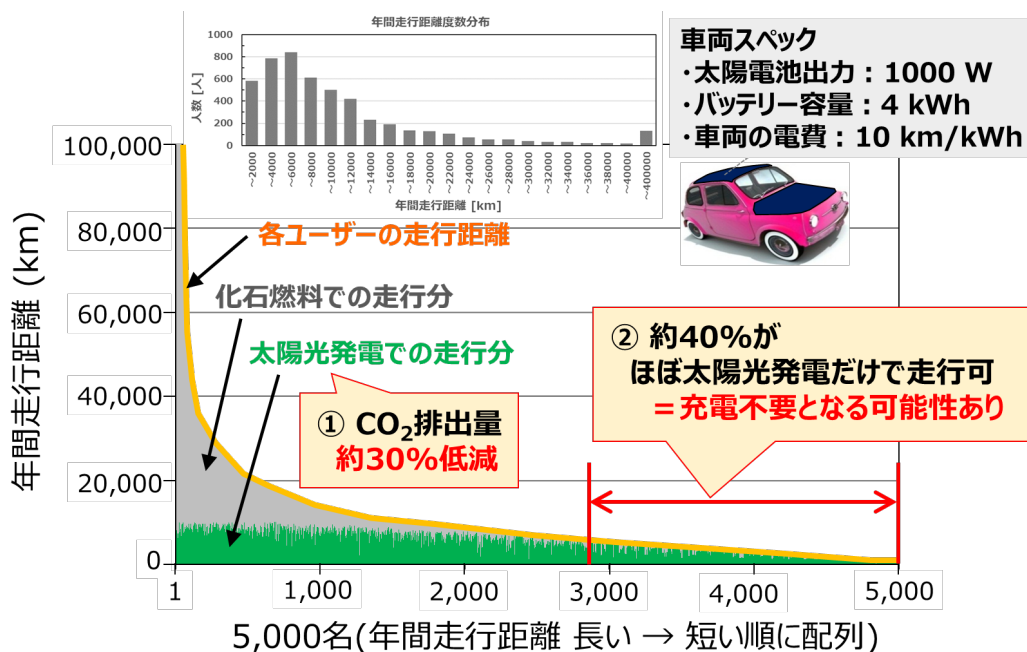


図 2.1-2 太陽光発電搭載による効果（シミュレーション結果）

### 2.1.3 公道実証実験：発電電力量と走行可能距離

現在、市販車両に搭載された太陽電池は定格出力が 200 W 程度であり、前述の CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が得られるような太陽電池とは大きな出力差がある。そこで、定格出力約 860 W の超高効率太陽電池を搭載した車両による公道実証試験を通じ、CO<sub>2</sub> 排出量の削減につながる、太陽光発電の発電電力量とそれによる走行可能距離の検証を行っている。

太陽電池の性能によらず、太陽電池搭載による効果の度合いは実際の走行パターンによって大きく左右される。そこで、実際の市場・ユーザーによる現実的な走行パターンとして、表 2.1-1 に示す走行パターンに沿った条件で、実証走行試験を行った。

表 2.1-1 実証走行試験の走行パターン

分類	想定使用方法	走行距離 (km/day)	走行パターン
A	高速利用	70	0:00 8:30 15:30 23:59 走行 ← 屋外駐車 → 走行
B	近郊街乗り (買物、送迎等)	5	0:00 10:00 11:30 23:59 ← 屋外駐車 → ← 屋外駐車 →
C	通勤 (郊外)	15	0:00 8:00 17:00 23:59 走行 ← 屋外駐車 → 走行
D	市街地	15	0:00 10:00 15:00 23:59 ← 屋外駐車 → ← 屋外駐車 → ← 屋外駐車 →

実証走行試験の代表的な結果として、走行パターン A で得られた結果を以下に示す。パターン A では、午前と午後それぞれ 35 km (1 日の合計走行距離は 70 km) の走行を行い、このパターンにおける車両走行電力消費率は約 10.1 km/kWh と計測された。

図 2.1-3 は、実証車に搭載された太陽電池の発電量とバッテリー残量 (State Of Charge: SOC) の変化を示したものである。SOC は、午前の走行により 66% から 24% に低下したが、走行後 (午前 10 時から午後 3 時まで) の屋外駐車の際に車載太陽電池による発電電力の充電により、58% に増加した。データは 2020 年 6 月に取得したものであるが、この日の車載太陽電池による発電電力量は約 4 kWh/日であり、車載太陽電池での発電により 30 km/日の走行が可能であることが実験的に確かめられた。

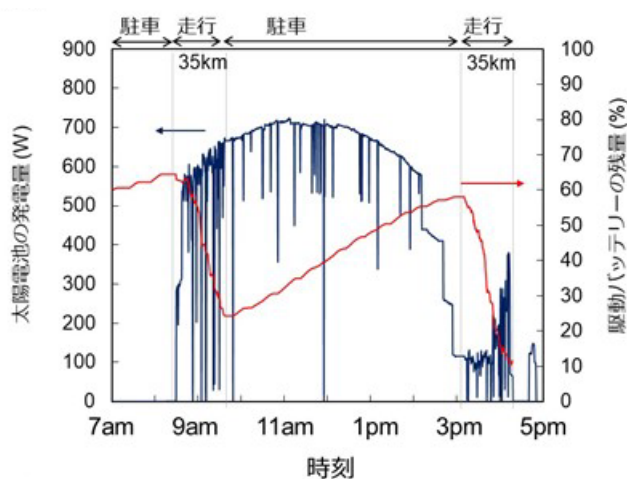


図 2.1-3 実証車に搭載した太陽電池の発電量と駆動バッテリー残量の推移



図 2.1-4 には、車載太陽電池での走行距離と一日当たりの日射量の測定結果を示す。日射量は、実証車の外板に取り付けられた複数の日射計で測定された平均値で、データは 2021 年 9 月に取得したものである。太陽光発電での走行距離は一日当たり日射量と比例関係にあり、比例定数は 5.9 (km/(kWh/m<sup>2</sup>)) と見積もられた。例えば、東京の年間日射量は約 1,200 kWh/m<sup>2</sup>/年であり、860 W の太陽電池を車載することにより、計算上では年間約 7,080 km の走行が可能ということになる。

以上の結果から、太陽電池を自動車に搭載することによる効果を実験的に確認できたと言える。

また、これらの結果に基づき、名古屋の日射量を用いて試算したところ、CO<sub>2</sub> 排出量が 62%削減することが可能という結果が得られた<sup>4</sup>。

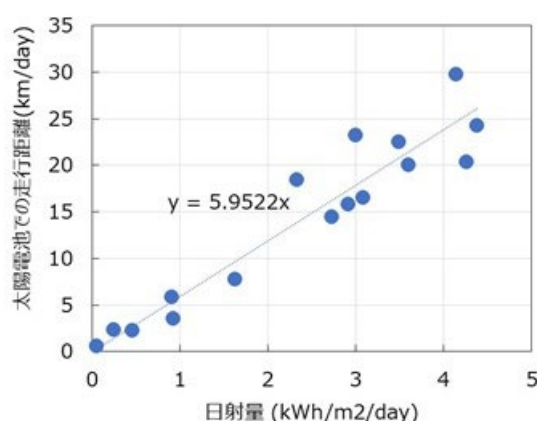


図 2.1-4 太陽エネルギーによる走行距離と日射量の関係

#### 2.1.4 今後の展望と課題

以上のように、太陽電池を自動車に搭載することにより CO<sub>2</sub> 排出量や電動車の充電回数の低減が期待され、実験的にも確認することができた。今後、自動車の使われ方の違いによる車載太陽電池の効果の違いを詳細に検証していくことが重要と言える。

太陽エネルギーで走行可能な自動車はまだ市販されて間もなく、今後の技術進展に大きな期待が寄せられている。将来、太陽電池を搭載した車両が普及し、さらには V2H や V2G のような利用形態が積極的に実施されるようになると、車載太陽電池は単に走行に使う電力を生み出すだけでなく、社会インフラの一部としてカーボンニュートラルな社会実現に大きな役割を果たすことができる。人々がより豊かで安全な生活を送ることのできる社会実現のため、車載太陽電池およびその周辺技術の開発を積極的に展開していくことが必要である。

## 2.2 電気自動車への太陽光発電システムの搭載：発電電力量と充電頻度削減効果、日射変動に対する性能の評価

### 2.2.1 実証試験の目的と車両諸元

電気自動車に太陽光発電システムを搭載し、その発電電力を車両駆動用バッテリーに蓄電し、車両走行として利用する実証実験を開始した。1) 発電量・充電頻度削減の実力把握、2) 部分影に対する性能評価、3) 走行時の MPPT 性能評価、等を実施することを目的に停車中および公道走行中の発電性能を取得している。

図 2.2-1 と図 2.2-2 に実証実験車両の外観と太陽光発電システムの概略を、表 2.2-1 に仕様を示す。ベース車両には日産自動車の eNV200 を使用しており、太陽光発電システムで発電した電力は 40 kWh の車両駆動用バッテリーに蓄電される。複数モジュールからなる太陽光発電パネル (PV パネル) は、ルーフ、フード、リアゲートの 3 か所に設置している。また、ルーフの PV パネルは 6 つ、フードとリアゲートの PV パネルはそれぞれ 2 つの太陽電池モジュールで構成されている。一つのモジュールは複数の単位セルを直並列接続して構成されており、一つのモジュールにつき、一つの MPPT コンバータが接続され、電力制御を行っている。太陽電池セルはシャープで開発された、モジュール変換効率 31.17% 相当の III-V 族化合物 3 接合型太陽電池を使用しており<sup>5</sup>、モジュールの最大電圧は、日光が一年で最も強い場合でも、安全のために 60 V 以下に保たれている。また、ルーフには日射照度を測定するために日射計を設置している。PV パネルと駆動用バッテリーの間に電力変換を行うコンバータシステムを接続しており、PV パネルの発電電力制御と電圧変換を行い駆動用バッテリーへ電力供給する。

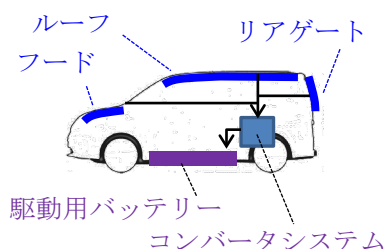


図 2.2-1 実証実験車両の外観

図 2.2-2 実証実験車両の太陽光発電システム

表 2.2-1 実証実験車両に搭載した太陽光発電システム仕様

ベース車両 (eNV200) 諸元			
車両種類	BEV		
バッテリー容量	40kWh		
太陽光発電システム諸元			
	ルーフ	フード	リアゲート
セル構造	GaAs-based 3-layer tandem		
セル開発企業	SHARP		
定格発電電力	1150 W		
モジュール数	6	2	2
モジュール搭載角度 (水平に対する角度)	0-20°	20°	0-20° (open) 80° (close)

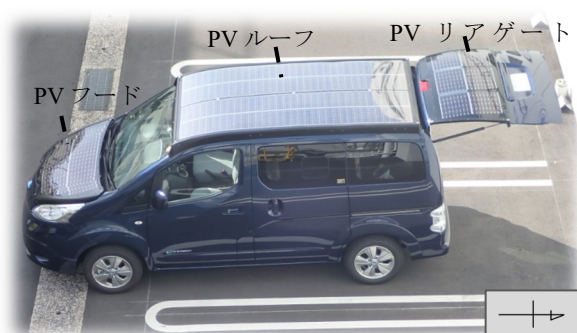


## 2.2.2 発電量と走行可能距離、充電頻度削減の実力把握

### (1) 年間発電電力量と走行可能距離

#### ① 実験・算出条件

実証実験車両で年間を通して発電量評価を行った。搭載した太陽電池システムの最大能力を把握するため、図 2.2-3 のようにいずれの太陽電池も水平に近づけてリアゲートを水平に展開した状態で測定した<sup>6</sup>。



場所：神奈川県横須賀市  
車両設置状態：南向きに停車しリアゲートを水平に展開  
天候：主に降雨のない日に測定

図 2.2-3 発電量評価時の車両

日々の実測結果と以下に示す計算手法を組み合わせ、発電電力から得られる月毎、および年間の EV 走行可能距離を算出した。具体的には、下式を用いて一日の発電エネルギー (Eg) 分の EV 走行可能距離を算出し、一年分積算した。

$$\text{EV 走行可能距離(一日の発電エネルギー分)} = \{ \text{一日の発電エネルギー } E_g \times c \} \text{ 電費 } \}$$
$$E_g = \{ a \} \text{ 一日の日射量 } E_r \times b \} \text{ 日射・発電係数 } \}$$

#### a) 一日の日射量 (Er)

- NEDO 日射量データベース (METPV-11)<sup>7</sup>を用いて算出する。
- 日本各地 (837 箇所) の 20 年間 (1990~2009 年) の代表年 (平均年、多照年、寡照年) の日射量データを参照することができ、一年間の日射量を 1 時間毎のデータとして使用することができる (図 2.2-4)。

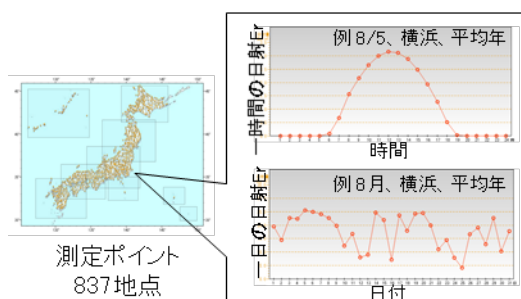


図 2.2-4 NEDO 日射量データベース<sup>7</sup>

#### b) 日射・発電係数 (日射量 (Er) と発電エネルギー (Eg) の関係)

- 発電量評価実験時に太陽光発電システムの発電電力と、車載日射計が示す日射量を測定

し、その相関関係を算出する（図 2.2-5）。

- ・ 日射量（ $E_r$ ）と発電エネルギー（ $E_g$ ）は、天気や時期によらず、概ね比例の関係であるため、一次の近似式を使って算出する。

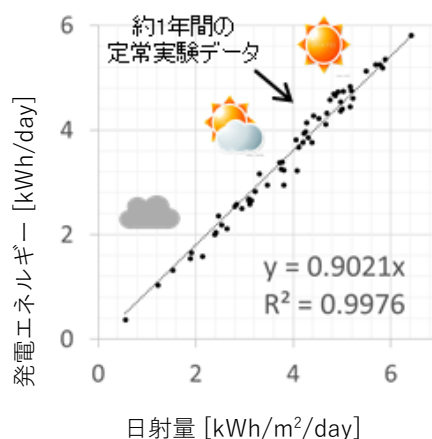


図 2.2-5 発電量評価時の発電エネルギーと日射量の関係

### c) 電費

- ・ 公道走行実験中の電費を使用する。電費は年平均で 6 km/kWh だが、エアコンの使用頻度の違い等によって季節ごとに電費が異なるため、計算には四半期ごとの電費変動を反映させている。

### ② 年間発電電力量と EV 走行可能距離の算出結果

図 2.2-6 に月毎の一ヵ月分の発電エネルギーと一日の発電エネルギー最大値を示す。今回の計算では横浜の平均年の日射量データベースを使用した。一日の発電エネルギー最大値の天候は基本的にどの日も快晴であり、太陽の高度の影響を反映した滑らかな曲線となっている。また、一ヵ月分の発電エネルギーのデータは、一日の発電エネルギー最大値のグラフと比較すると、6月と10月が低くなっているが、これは梅雨や秋雨前線等に起因した天気の影響を反映した結果と言える。

図 2.2-7 に月毎の一ヵ月分の発電エネルギーから計算した EV 走行可能距離を示す。一年間では約 7,100 km、一日あたりでは平均で約 20 km 走行可能であることがわかった。図 2.2-6 に示すように、一ヵ月の発電エネルギーが多いのは7月や8月であったが、EV 走行可能距離としては4月や5月が多い結果となった。これは、季節による電費の違いと晴天日数の違いが影響している。6月のEV 走行可能距離が落ち込んでいるのは梅雨の時期で曇天の日が多いことに起因している。また、夏と比較して、冬では太陽光発電によって獲得できる EV 走行可能距離が半分程度となった。

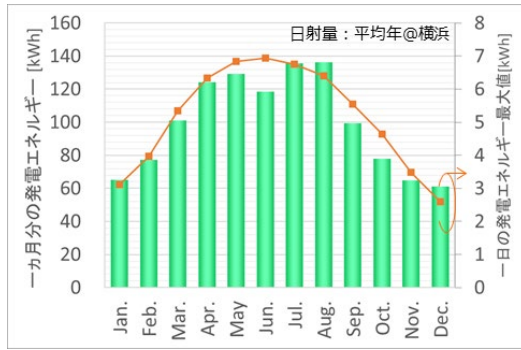


図 2.2-6 月ごとの発電エネルギーと一日当たりの発電エネルギー最大値

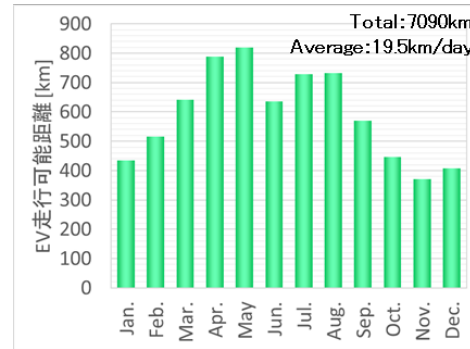


図 2.2-7 月ごとの EV 走行可能距離

## (2) 充電頻度削減効果

太陽光発電で EV 駆動用バッテリーを充電することで、充電頻度の削減が期待できる。実証実験車でその効果を検証した。

### ① 算出方法と算出試算条件

走行パターンは、「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書」（2018 年 1 月）<sup>3</sup>に記載の代表的な自動車利用パターンを参考に、「C：平日通勤利用のみ」（表 2.2-2）とした。また、片道の通勤距離をパラメータ（10、15、20、25 km）とし、年間の充電回数を太陽光発電有りの場合と無しの場合について算出した。

表 2.2-2 代表的な自動車利用パターン抜粋<sup>3</sup>

パターン	タイプ	一回あたりの走行距離 (km)	ユーザーイメージ
C 平日利用	C-1 長距離通勤利用型	50km @5 日間 (平日)	遠距離先への会社などへの通勤に平日のみ利用。
	C-2 短距離通勤利用型	15km @5 日間 (平日)	短距離先への会社などへの通勤に平日のみ利用。

バッテリーのエネルギー（バッテリー電力残存量：SOC）は、n 日目を基準とした場合、n+1 日目のバッテリーエネルギーを下式により算出した。算出条件は表 2.2-3 のとおりである。

$En_{Ba\_n+1}$	$= En_{Ba\_n} - En_{Dr\_n} + En_{So\_n}$
$En_{Dr\_n}$	$= Di_{Dr\_n} \div Ef_{Dr\_n}$
$En_{So\_n}$	$= Ef_{Sun\_n} \times Ef_{So\_n}$
If ( $En_{Ba\_n+1} < En_{Ba\_min}$ )	... $En_{Ba\_n+1}$ を $En_{Ba\_max}$ で上書き (充電回数+1回)
If ( $En_{Ba\_n+1} > En_{Ba\_max}$ )	... $En_{Ba\_n+1}$ を $En_{Ba\_max}$ で上書き (満充電模擬)
$En_{Ba\_n}$	: n 日目のバッテリーエネルギー
$En_{Dr\_n}$	: n 日目の走行用消費エネルギー
$En_{So\_n}$	: n 日目の太陽光発電エネルギー
$Di_{Dr\_n}$	: n 日目の走行距離
$Ef_{Dr\_n}$	: n 日目の電費
$Ef_{Sun\_n}$	: n 日目の日射量
$Ef_{So\_n}$	: n 日目の太陽光発電効率
$En_{Ba\_max}$	: バッテリーエネルギー充電上限値
$En_{Ba\_min}$	: バッテリーエネルギー放電下限値

表 2.2-3 バッテリーエネルギーの算出条件

日射量	NEDO 日射量データベース (横浜、平均年)
太陽電池発電効率、電費、走行距離	実証実験結果に基づく値を使用
バッテリーエネルギー初期値	24 kWh
バッテリーエネルギー充電上限値	40 kWh
バッテリーエネルギー放電下限値	8 kWh

## ② 充電頻度削減効果の算出結果

図 2.2-8 に通勤距離 10 km (往復 20 km) の場合の、一年間のバッテリーエネルギーの推移の計算値を示す。平日は太陽光発電エネルギーよりも走行用の消費エネルギーの方が多いため、バッテリーエネルギーが低下していくが、休日は太陽光発電エネルギー分がそのまま充電できるため、バッテリーエネルギーが増加する。冬 (12 月、1 月) に関しては、平日でのバッテリーエネルギーの減少量と休日のバッテリーエネルギーの増加量が概ね等しくなっており、充電不要となる運用がちょうど実現できている。冬以外においては、休日のバッテリーエネルギー増加量の方が平日のバッテリー減少量よりも多いため、バッテリーの電力が上限値 (40 kWh) 付近に保持されている。これは、太陽光発電電力が余っていることを意味している。また、年間を通してバッテリーエネルギー下限値を下回ることを防止できており、充電不要が達成できる見込みである。

図 2.2-9 に通勤距離 25 km (往復 50 km) の場合の一年間のバッテリーエネルギーの推移の計算値を示す。休日のバッテリーエネルギーの増加量よりも、平日のバッテリー減少量の方が多いため、バッテリーエネルギー下限値を下回ることが多数発生しており、このケースでは充電不要となる運用を達成ができないことがわかった。

図 2.2-10 に通勤距離が片道 10~25 km の場合の、太陽光発電有りの場合と無しの場合の年間の充電回数を示す。充電不要となる運用を達成できるのは通勤距離が 10 km までであるが、通勤距離 10 km 以上の人でも、大幅に年間充電回数を削減できることがわかった。例えば、通勤距離 25 km 圏の場合は、年間充電回数を 48%程度削減できる見込みである。

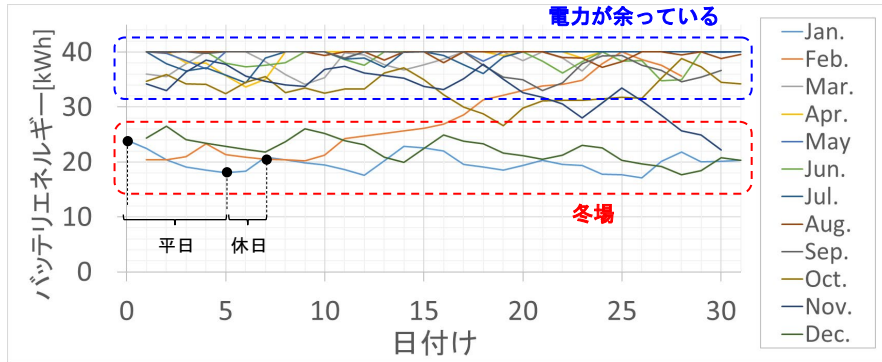


図 2.2-8 通勤距離 10 km の場合のバッテリーエネルギーの推移

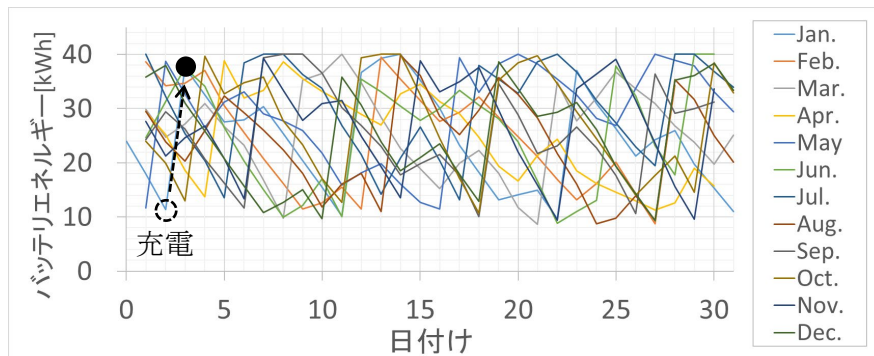


図 2.2-9 通勤距離 25 km の場合のバッテリーエネルギーの推移

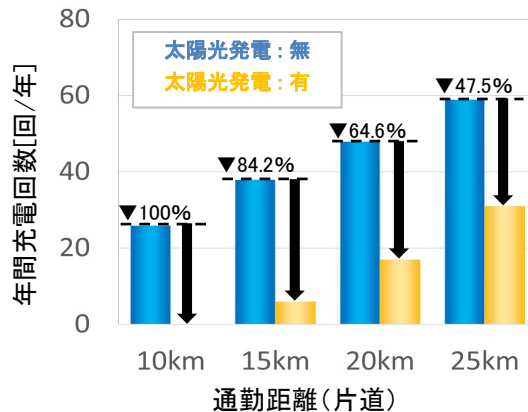


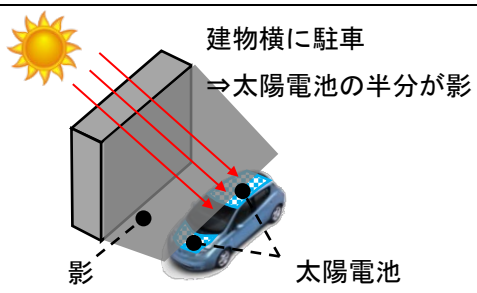
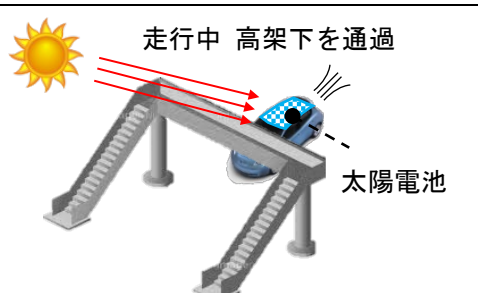
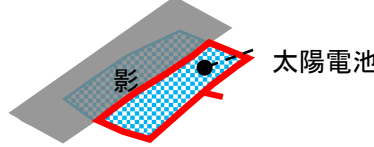
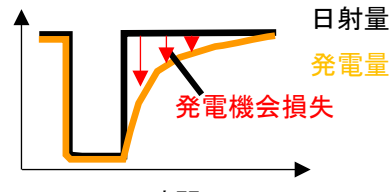
図 2.2-10 通勤使用時の年間バッテリー充電回数

### 2.2.3 日射変動に対する性能評価

#### (1) 日射変動に関する課題

車載太陽電池システムの特有の課題として、移動体に搭載しているため太陽電池への日射が不特定な形状とタイミングで遮られ、日射変動が頻繁に起こることが挙げられる。日射変動が起こる状況としてはi) 車載太陽電池の一部分が影になる状況や、ii) 走行中に日射が急激に変動する状況がある (表 2.2-4)。以降に、それぞれの日射変動への対応について示す。

表 2.2-4 車載太陽電池における日射変動が起こる状況

	i) 部分的な影	ii) 過渡的な日射変動
シーン		
課題	 <p>影になっている部分の影響で <u>日が当たっている部分の性能も低下</u></p>	 <p>日射量の急激な変化に <u>発電制御が追い付かない</u></p>

## (2) 部分的な影への対応

### ① 対応策

図 2.2-11 にコンバータシステムを示す。部分的な影に対応するため、太陽電池モジュールを分割し、それぞれコンバータを搭載することで、個別に Maximum Power Point Tracking (MPPT) 制御できるような構成となっている。また、強電システムへの昇圧機能は後段のコンバータが機能を担っている。このため、部分影等が生じた場合でも、影になった太陽電池モジュールの影響を受けることなく、後段のコンバータが影になっていない太陽電池モジュールの電力を昇圧することが可能である<sup>8)</sup>。

図 2.2-12 は各太陽電池モジュールの太陽電池セルの接続方法を示している。ストリングは 16 直列した太陽電池セルで構成され、これを 11 並列にすることで太陽電池モジュールを構成する。この接続方法の影響により、図 2.2-12 の Shadow A のように影がかかる場合は太陽電池セルの並列方向が影に覆われていくので、太陽電池モジュール電圧が下がらずに電流が下がる (図 2.2-13)。一方で Shadow B のように影がかかる場合は、太陽電池セルの直列方向が影に覆われるため、影の面積が増えるにしたがい、太陽電池モジュールの電流は下がらずに電圧が低下する。電圧が変わらないほうが、コンバータ内の昇圧比の最適点を維持できるので、Shadow A のような影のかかり方に対してロバスト性が高いと考えられる。車両の走行時は Shadow A のような影の移動が支配的なため、この方向の影にロバストとなるようにセルを配置した。

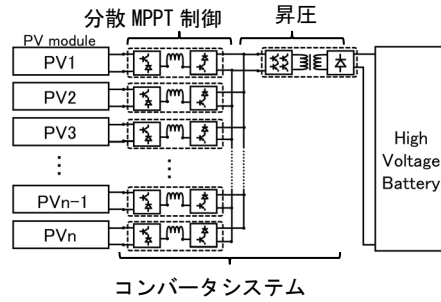


図 2.2-11 コンバータシステム概要<sup>6</sup>

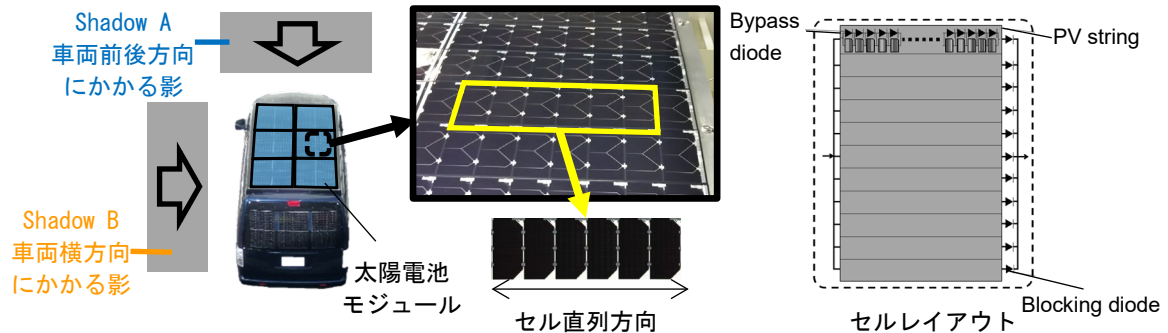


図 2.2-12 太陽電池セルレイアウトと車体及び影との位置関係

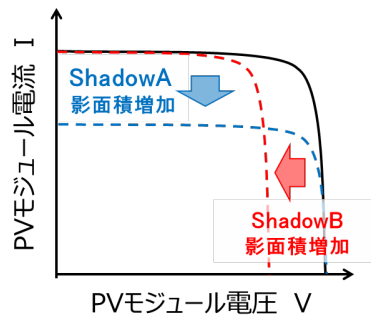


図 2.2-13 PV モジュールの IV 特性

## ② 評価結果

図 2.2-12 に示すような二種類の方向から、遮蔽物により人工的な影を作って実験を行った。Shadow A は前から後ろに流れる影を、Shadow B は左か右に流れる影を模擬している。

図 2.2-14 に Shadow A と Shadow B の時の影面積に対する正規化したルーフ電力の関係を示す。なお正規化は影面積率が 0% の時のルーフ電力を用いて実施した。Shadow A は影面積の増加にしたがい線形的に正規化ルーフ電力も低下したが、Shadow B は階段状に正規化ルーフ電力が低下した。また、Shadow A と比較して、Shadow B の方が低下量が多い結果となった。

図 2.2-15 (a) は Shadow A の影面積 17% (1/6) の時の正規化した太陽電池モジュール電力、電圧、電流である。PV1、PV4 の半分が影に覆われており、モジュール電流は半分になっているが、影は太陽電池セルの並列方向を覆っているため、モジュール電圧は維持されていることがわかる。その結果、モジュール電力も影に覆われている分のみ低下していることがわかる。

図 2.2-15 (b) は Shadow B の影面積 12.5% (1/8) の時の正規化した太陽電池モジュール電力、電圧、電流である。PV1、PV2、PV3 の 1/4 が影に覆われている状態で、モジュール電圧が影面積



0%の値の 1/4 よりも少し低下している。また、電流も影面積 0%の値より少し低下している。これは、影になった部分のバイパスダイオードを電流が通過した分の電圧降下が発生し、それに伴い MPPT 制御により新たな最適動作点に移行する中で、電流が下げられたと推察される。

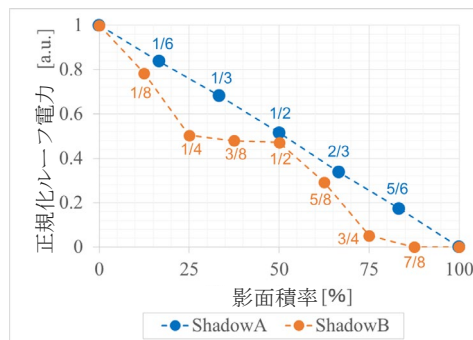


図 2.2-14 影面積率と正規化ループ発電電力<sup>8</sup>

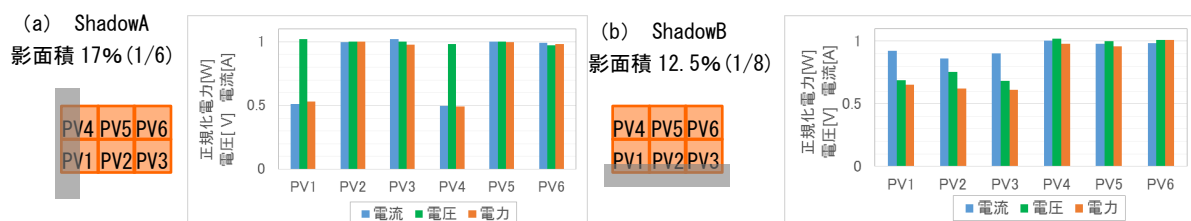


図 2.2-15 正規化した PV モジュール電力、電圧、電流<sup>8</sup>

## (2) 過渡的な日射変動への対応

### ① 対応策

図 2.2-11 のコンバータシステムにおいて、各太陽電池モジュールの動作点を Maximum Power Point Tracking (MPPT) 制御にて常時更新している。探索の手法としては一般的な山登り法で太陽電池モジュールの動作電圧を変更しながら最大電力となる動作点に追従させている。街路樹の影の下を通過する場合のように、短時間に複雑な日射変動が発生するような状況では、最大電力点を探索している間に太陽電池モジュールの電圧-電流特性が次々と変化し、最大電力点の到達に時間がかかり、発電電力の機会損失が発生する場合がある。そこで今回は MPPT 制御の電圧探索範囲を制限することで、日射が頻繁に変動するシーンにおける制御追従性を向上させることを試みた。

### ② 実験方法（公道走行による評価）

図 2.2-16 に示すように、道路の両脇に街路樹が植えられている場所で MPPT 制御の評価を行った。この場所は日影と日向が繰り返すため、MPPT 制御は追従しにくい場所である。実験方法としては、図 2.2-17 に示すように探索開始電圧を変化させ、MPPT 達成率（下式参照）を測定する。MPPT 達成率は、日射量から推定される MPP での太陽光発電電力に対する実際の発電電力の比率であり、MPPT 制御の達成性能を表している。



図 2.2-16 評価シーン

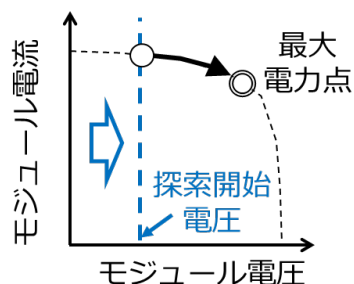


図 2.2-17 MPPT 制御の探索開始電圧

$$AR_{MPP} = \frac{P_{AVE}}{S_{AVE}} \div R_{MPP} \times 100$$

$AR_{MPP}$	: MPPT 達成率
$P_{AVE}$	: PV 発電電力平均値
$S_{AVE}$	: 日射量平均値
$R_{MPP}$	: 日射量に対する PV 発電電力@MPP

### ③ 実験結果

図 2.2-18 に MPPT 制御探索開始電圧に対する MPPT 達成率の関係を示す。図に示すとおり、MPPT 制御探索開始電圧を上げるほど MPPT 達成率が上がる結果となった。MPPT 制御探索開始電圧を上げ探索範囲を制限することにより、MPPT 制御の応答性が向上したといえる。また、MPPT 制御探索開始電圧を 40 V まで上げると MPPT 達成率が大幅に低下した。これは、MPP 電圧が 38 V 程度であるため、定常的に MPP で運転できなくなってしまうと推察される。結果的には、探索開始電圧を 20-35 V にすることで、MPPT 達成率を 97%以上にすることが可能であることがわかった。

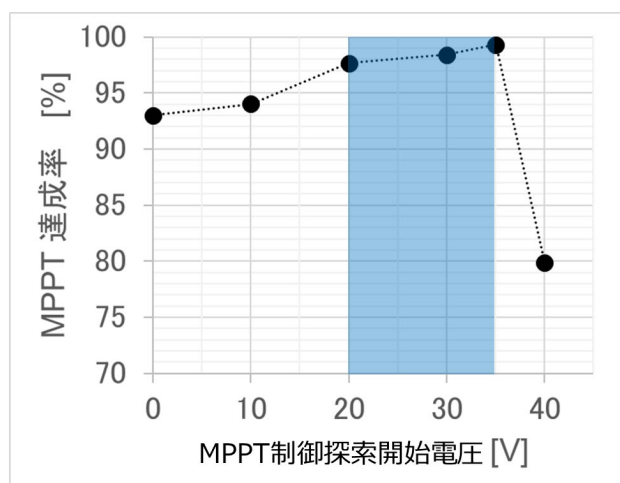


図 2.2-18 MPPT 制御探索開始電圧と MPPT 達成率の関係<sup>6</sup>

図 2.2-19 に街路樹の横を通過した際の評価結果を示す。MPPT 制御の探索範囲を全領域とした場合（左）と制限した場合（右）について、上記評価ポイントにおける日射量と PV ルーフの発電電力の関係を表している。探索範囲を全領域とした場合（左）では MPP の探索に時間がかかるため、日陰から日向に車が移動することに伴い日射量が回復しても、PV ルーフの発電電力が

回復しきれていないが、制限した場合（右）においては日射量の回復に伴い、PV ルーフの発電電力も回復できた。このように、MPPT 制御の探索範囲を適切に制限することで、MPPT 制御の追従性を向上することができた。

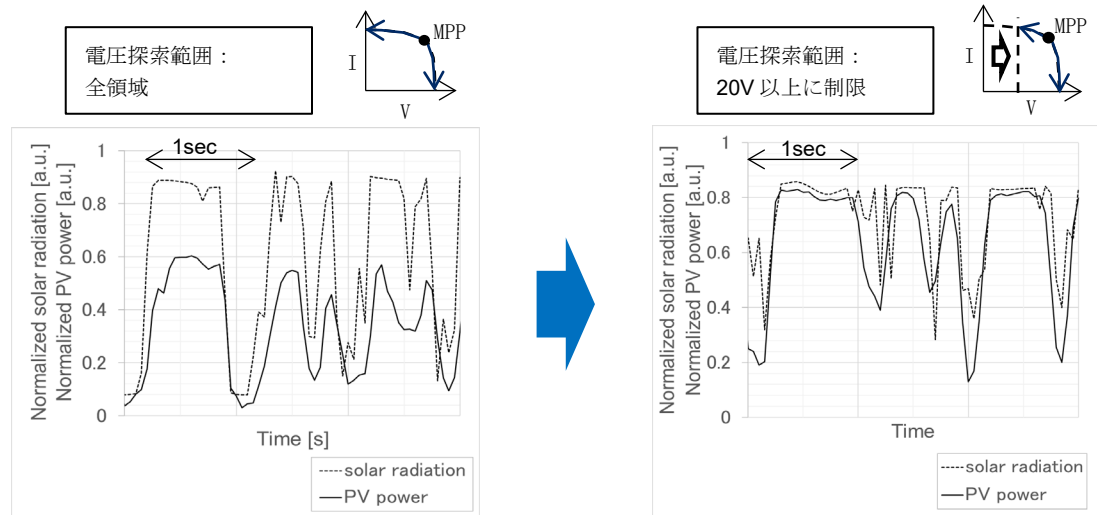


図 2.2-19 日射量と PV ルーフの発電電力の関係<sup>6</sup>

#### 2.2.4 今後の課題と展望

太陽エネルギーを走行に用いる電気自動車の市場はまだ黎明期にあり、実走行中のデータの更なる蓄積が望まれる。

本項で報告したように車体にかかる影の特徴に応じたシステム設計が求められるが、影のパターンは無数に存在するため、どのようなパターンが支配的かを把握するためにも多様な条件での走行データ取得が不可欠である。また、車両に搭載した太陽光発電システムの長期的な性能や機能の推移についても今後調査を進めていく。

## 【第 2 章 参考文献】

---

<sup>1</sup> IEA : World Energy Outlook 2022 (2022)

<sup>2</sup> T. Masuda, K. Araki, K. Okumura, S. Urabe, Y. Kudo, K. Kimura, T. Nakado, A. Sato and M. Yamaguchi : "Static concentrator photovoltaics for automotive applications", Solar Energy. 46, 523 (2017)

<sup>3</sup> NEDO : 「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書」(2018年1月)  
(<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>)

<sup>4</sup> T. Masuda, T. Nakado, M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Nishioka and K. Yamada : "Public road tests of Toyota Prius Prime equipped with high-efficiency photovoltaic modules with output power of 860 W", 49<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2022.

<sup>5</sup> NEDO : ニュースリリース「世界最高水準の高効率な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池パネルを製作」(2020年7月6日) ([https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101326.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101326.html))

<sup>6</sup> Y. Tomita, M. Saito, Y. Nagai, T. Tanimoto, T. Arai and K. Nishijima : "MPPT operation performance of automotive photovoltaic system during driving", IPEC2022 ECCE ASIA, 19H1-2

<sup>7</sup> NEDO ホームページ「日射に関するデータベース」(<https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>)

<sup>8</sup> Y. Tomita, M. Saito, Y. Nagai, Y. Zushi, T. Tanimoto and K. Nishijima : "Development of an Electric Vehicle with a High-Power Photovoltaic System", EVTeC 2021, 20214307 C1.4

### 第3章 太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組み

第2章では、自動車会社が実施している太陽光発電システム搭載自動車の実証走行により、これまでに得られている知見などを示した。

一方、自動車に搭載される太陽電池には、建物屋根や地上などに設置されている従来からの一般的な固定設置型（以下、一般型）と比較して、要求される技術、要件、発電特性など様々な相違がある（表3-1）<sup>1</sup>。

ここでは、このような視点に基づき実施されている、太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組みの概略を紹介する。

表 3-1 一般型太陽電池と自動車搭載用太陽電池の相違の例

項目	一般的な固定設置型太陽電池	自動車搭載太陽電池
周辺日影 太陽光の利用	日影がかからないように設置される 太陽光を最大限利用できる方位・角度で 設置される	頻繁に影がかかる 周辺建物による日射遮蔽や反射の影響 を受ける
部分日影 動的日影	影響少ない	影響大きい
非平面性	平面 太陽光は一樣に照射	曲面 非一樣な太陽光 曲げることにより割れやすくなる
環境試験	主に屋外環境下での長期劣化を試験す る IEC 規格	過酷な負荷でも基本性能や安全性を維 持できることを試験する ISO 規格、JASO 規格

#### 3.1 周辺環境の日射量や発電量への影響

一般型の太陽光発電システムでの発電量予測では、Monsole 等のデータベースが使われているが、このベースとなっているのは、直達光と一樣な天空散乱光、一樣な地表と天空との間の多重反射の和が固定されたパネルへの日射強度に一致するという考え方である。

一方、自動車に搭載された太陽電池へは、ビル、住宅、電柱、道路標識、街路樹、電線など、大きさや方向もさまざまな影がかかる。つまり、一樣な地表という前提が成立しないため、一般型太陽光発電システムで使われている手法や公式などはそのまま適用できない<sup>2</sup>。

方向に関しては、前後方向は道路が開けている関係で、日影の頻度は少ないが、左右方向、特に自動車の左側は頻繁に影がかかる<sup>3</sup>。自動車の走行方向は固定されていないので、日射に影響を与える影の分布およびこれに伴う日射分布については、地表面に固定した座標系で扱うことはできず、車体に固定した局所座標系で扱う必要がある。また、自動車搭載用の太陽電池は軸対称ではない曲面なので、一樣な光を受光しても、パネルの前後左右で太陽光の受光量も異なってくる。この意味でも、車体に固定した局所座標系で受光量や発電量のモデルを再構築する必要がある<sup>4</sup>。各種部分影（前章で論じられた過渡的な部分影、および、同様な作用を及ぼす曲面への不均等照射の概念を図3.1-1に示す<sup>5</sup>。



図 3.1-1 曲面、部分日影、動的日影が出力低下に与える影響の概念図

ここでは、以下のステップで自動車周辺環境の日射量や発電量への影響を示す。

- ・ 自動車周辺の日影を作る建物などの方位、仰角分布の測量および標準モデル
- ・ 上記日影分布に伴う日射強度の計測（モデルの検証）
- ・ 部分日影源の方位、仰角分布の測量、および発電量への影響

### 3.1.1 自動車周辺の日影を作る建物などの分布

#### (1) 方法

自動車屋根に魚眼レンズ付き防犯ビデオを取り付け、宮崎市内を走行した（開放地、住宅地、ビル群をほぼ等分に含む巡回エリア）。これにより、車体屋根面から見て、建物や電柱などの日影源がどの方向に、また、どの程度の仰角に分布しているかを把握した。

得られた車体屋根面での天空魚眼像に対し、画像処理を行い、建物等の障害物と天空開口部とを2値分離した。建物等の輪郭線の座標（極座標）を読み取り、仰角方向の分布を調査した。なお、屋根面における水平面日射強度を算出する際には、障害物の方位角分布を考慮する必要はない。

また、部分日影の分布については、上記2値分離した後に輪郭抽出し、輪郭点の集合の分布を調べることで発生確率を分析出来る。ただし、あくまで、部分日影が発生したか否かであり、部分日影の大きさや形状により発電量に与える影響は異なるので、その影響度（部分日影因子 PSF）を別途測量する必要がある。年間発電量を議論する場合には、PSF の分布は平均化され、他の要因とは独立と考えられるので、期待値として算出することができる。

#### (2) 結果

建物などの周辺構造物が太陽を遮蔽する確率は、仰角が大きくなるほど小さくなる。このため、成長曲線に当てはめ、分布をモデル化した。その結果、累積ロジスティック曲線が、様々な周辺環境に対しても当てはまり性が良いこと、大まかに見て、道路周辺の日影環境は、ビル群、住宅地、開放地の3種類に類型化できることが判明し、それぞれにおいて標準的な日影確率関数を定義した（図 3.1-2）。なお、車両に対し左右方向の方が前後方向（進行方向）に比べ、日影障害物の

仰角が高い傾向にあるので（特にビル群、住宅地）、左右方向、前後方向と別々の日影確率を想定する必要がある。

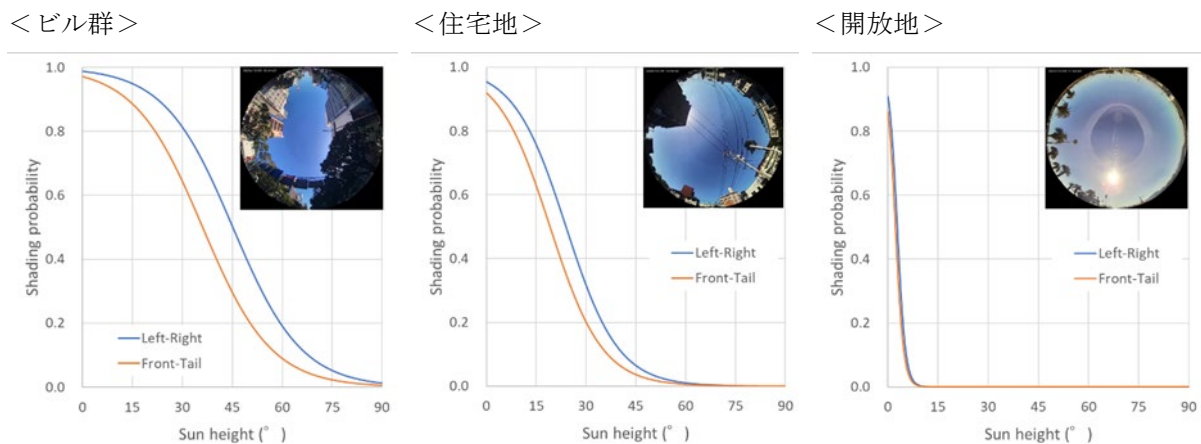


図 3.1-2 建物などの周辺構造物が太陽を遮蔽する確率（各ゾーンでの標準的な仰角分布）

これを用いることにより、様々な地域における、様々な走行エリアの日射量を予測することができる。例として、長岡（新潟県）、および宮崎（宮崎県）の住宅地走行における自動車屋根の搭載面の日射量を月別に示す（図 3.1-3）。なお、一般型太陽電池との比較のため、無日影状態で最適方位・傾斜角で設置したときの日射量も同時にプロットし、比較できるようにしている。周辺建物などの日影の影響により、屋根搭載面での日射量は住宅地では 7 割程度になる（季節や地域により異なる）。

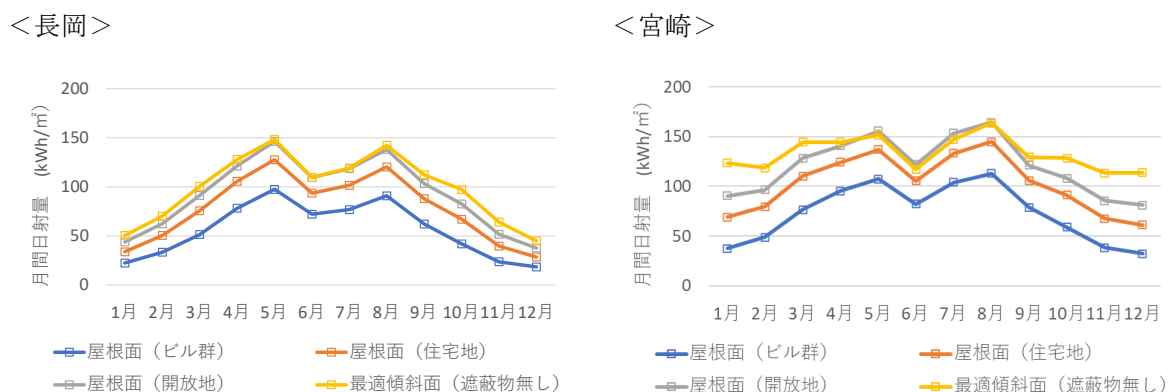


図 3.1-3 住宅地走行における自動車屋根の搭載面の日射量算出結果

### 3.1.2 日影分布に伴う日射強度モデルの検証

#### (1) 方法

自動車の屋根、前側面、左側面、右側面、後側面の直交する 5 軸の方向に日射計を取り付け、天空魚眼像から算出した開口部形状からビル壁面反射などを考慮した各軸の日射量の計算値と比較し、走行方位や走行地区の日影状況に関わらず、自動車周辺の 3 次元日射（車両各面の日射強度）がモデルから算出した値と一致しているかどうかを検証した<sup>6</sup>。

なお、屋根面のみでなく、前側面、左側面、右側面、後側面の直交する 5 軸を同時測定し、全



ての面で計算値と計測値の一致を確認するのは、屋根面の評価では、たまたま計測日には一致するが他の日や走行路が変わった場合に一致しないといったことが生じ得るため、そのような可能性（偽検証）を排除するためである。

## (2) 結果

走行方位（自動車局所座標における太陽の位置）、ビル群、住宅地、開放地などの走行ゾーンにかかわらず、また、5 軸すべてにおいて計測した日射強度は観測した天空開口形状から算出した日射強度にほぼ一致した（図 3.1-4）。ここで、GHI は、走行地近隣における水平面全天日射強度を示す。

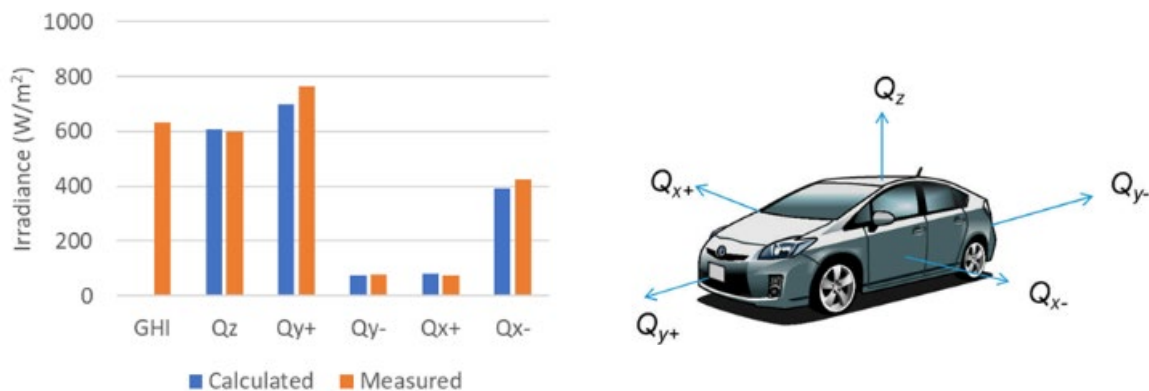


図 3.1-4 車体各面での日射量計測結果と 3 次元日射（不均等遮蔽）モデルとの比較

### 3.1.3 部分日影源の方位、仰角分布の測量、および発電量への影響

同様に、部分日影に関しても、魚眼ビデオから画像解析により所定の太陽高度における発生確率を算出することができる。しかしながら、部分日影の発電量に対する影響は、部分日影の形状や大きさに強く依存するため、車体の曲面形状や、モジュールの内部配線（ストリング構成）にも影響する。したがって、発生確率だけでは発電出力を算出することができない<sup>7</sup>。

一方、月間あるいは年間の発電量の議論においては、上記擾乱要因を期待値として代表させることにより算出することは可能である。例えば、代表的な屋根曲面、2 ストリング構成（MPPT×2）で車体屋根の中央部のセルに極度の曲げストレスがかからない条件で配置した場合（セル被覆率約 80%）、後述の曲面損失も合わせ、補正係数として 0.9 を乗じると良い近似となる。ただし、電費を向上させるために空力特性の優れた車体を使った場合には、これらの損失は大きくなる傾向にあるため注意が必要である。また、この係数は期待値を元にして算出したものであり、年間を通しての発電量（運転時刻、時間、走行方向はランダム）に対する補正係数である。したがって、特定の日時での発電電力の補正には使えないことに注意を要する（特定の日時での発電電力補正には、天空の開口状況を 2 次元行列化して、これに直射日射ベクトルや散乱日射ベクトルを作用させてから天空半球面で積分するなどの 2 次元演算が必要となる）。

### 3.1.4 周辺環境毎の自動車屋根面の日射量

自動車に搭載した太陽電池の定格出力あたりの発電量と、一般型太陽電池（真南方位、最適傾斜角設置、日影無し）との発電量の比較を図 3.1-5 に示す。自動車の屋根にどの程度の面積の太陽

電池を搭載できるかについては、次節（3.2）に示すが、地域差よりも、太陽電池が置かれた街区の日影環境が発電量に大きな影響を及ぼすことがわかる。

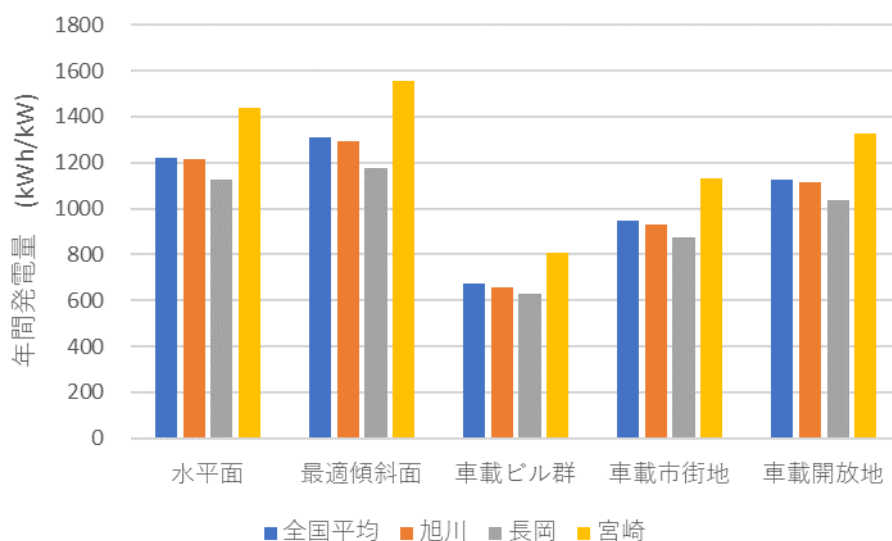


図 3.1-5 自動車に搭載した太陽電池の発電量

### 3.1.5 課題と展望（周辺環境の日射量や発電量への影響）

下記の課題が挙げられる。

- ・ エネルギー定格国際標準化
  - 車載太陽電池が供給できるエネルギー量は太陽電池搭載車の駆動エネルギーの自給率につながり、航続距離、充電頻度、カーボンオフセット量（優遇制度）の算定基準となるので、公正、かつ、試験機関ごとに再現性のある計測および算定方法につき、国際合意の上、標準化を行う必要がある。本件について、国際電気標準会議（IEC）でプロジェクトチーム（PT600）が発足し、日本から議長が選ばれ、日本主導で標準化が進められている<sup>8,9,10,11</sup>。
- ・ オンサイト計測方法の標準化
  - ユーザーを含め、第三者が車載太陽電池および搭載車のメリットを検証するには、オンサイト計測方法の確立が必要となる。前述の通り、車載太陽電池の発電量は従来型の太陽電池の延長線上で議論できないので、計測方法についても、公正な議論の下、策定することが求められる。本件についても、上記の PT600 の場において日本主導で議論が進められている。
- ・ タンデム太陽電池の発電性能計測・モデル化
  - タンデム太陽電池（III-V、ペロブスカイト）が車載太陽電池用のセルとして開発が進められている。これらタンデム太陽電池は太陽光スペクトルの変動に対し発電量が変動する特徴を有しており、車載面のように頻繁に日影がかかる環境では、影響が甚大となる。本目的で、走行中の太陽光スペクトル高速計測技術、この結果を用いた発電モデル、および、タンデム太陽電池搭載車による検証が求められている<sup>12,13</sup>。

- エコナビシステム
  - これまでの太陽光発電の発電量予測は、地域毎の気象条件から日射量を推定したモデル（Monsola、METPV）が専ら使われてきた。車載太陽電池の場合、地域差よりも、どこを走行（駐車）したか（ビル群、住宅地、開放地）が重要となる。したがって、地域差よりも、おそらく、主要路線（例えば国道10号線）の基点から〇〇kmにおける日射補正量といったデータベース構成が現実的になってくると考えられる。基本、自動車は路線と平行な向きであるので、局所座標系との相性も良い。
- 防災計画の策定
  - 電動車はV2Eの活用により、被災時の救護拠点・避難拠点への電力供給が期待されている。一方、こういった拠点へ電力供給すれば、自前のエネルギーが目減りするるので、被災時といえども公共財への提供がスムーズに進むかといった点では議論がある。充電ステーションも、系統などライフラインが途絶えれば、おそらく機能しないと予想される。太陽電池搭載車では、太陽光により自己充電できるので、こういった懸念は少ない。前述の通り、車載太陽電池の発電量のモデル化が進んできたことを受け、社会行動の数理モデル化を含むモンテカルロシミュレーションにより、大規模災害発生時に車載太陽電池で充電した電力をレジリエンスにどのように活用するかについての定量的な議論が始まった（太陽光発電研究組合（PVTEC）第6回移動体太陽電池ウェビナー、2022年2月24日）。今後、コミュニティーセンターや老人介護施設、学校、道の駅などの定置型防災救護設備と統合した地域防災態勢のより踏み込んだ計画策定が期待される。

## 3.2 車体形状の統計的把握と発電量への影響

### 3.2.1 車体形状把握の必要性

自動車の屋根を含む車体は一般に 3 次元曲面（非展開面）である。車体に太陽電池を被覆した場合、同じく曲面となる。一方、太陽電池の発電性能に関する公式や計測方法は、太陽電池が平面であることを前提に構築されており、曲面の太陽電池から得られる発電量は、平面の時のように、太陽電池のセルの合計出力から算出することはできない<sup>1</sup>。

曲面による発電出力および発電量への影響は、自動車搭載用太陽電池の場合、下記のポイントにまとめることができる<sup>5</sup>。

- ・ 開口損失: 開口面積の低下により、同じ日射強度でも入射パワーが低下する。すなわち、 $(\text{表面積}) > (\text{投影面積})$  のため、太陽電池が補足する光の開口面積は平面の場合より低くなる。
- ・ 自己影
- ・ 局所的余弦損失: 同じ角度で入射する平行光線であっても、曲面の場所により面素への入射角が異なるので、セルからの出力が非一様化し、ミスマッチング損失が発生する。

注意すべき点は、これらの損失は、曲面形状だけでなく、入射する太陽光の角度分布にも強く影響を受けるということである。単に定数を掛け合わせればよいということではなく、前節で論じたビルや住宅、街路樹、電柱、電線などによる日影および部分日影の分布度合いも考慮して補正量を算定する必要がある。

また、曲率の大きい箇所（曲率半径の小さい箇所）ではセルへの圧縮応力が高くなり、座屈破壊に繋がるため、必ずしも被覆できるとは限らない領域が出てくる。すなわち、セルの被覆率も低下することになる<sup>14</sup>。

このように、車体曲面の形状の影響は甚大であり、また、車種により様々である。

ここでは、車体形状の把握とその影響の定量化につき論じる。なお、自動車搭載用太陽電池の価値を左右する曲面太陽電池性能、発電量については、これまでの太陽電池の手法を使うことができない。現在、様々な議論が実施されている途中であるため、本報告書では触れないが、公正かつ、再現性のある試験方法や性能表示方法など、日本主導で国際標準化が進められている<sup>11</sup>。

### 3.2.2 車体形状の統計的把握方法

市販車の曲面形状、例えば、CAD ファイルはメーカーから公開されていない。しかしながら、トレース図面については、精度は劣るものの、入手および利用が可能である。ここで示す調査結果は、国産車 100 車種でのトレース図面から座標を読み取ることにより行ったものである。また、太陽電池搭載車の試作品ではリアウインドウへも太陽電池を被覆しているケースも見られるため、ここでも、リアウインドウを含む屋根と含まない屋根の和集合として座標データの収集を行った。

次に、曲面を特徴付けるパラメータを抽出し、これらの分布および各パラメータの相関関係より、統計的に母集団を推定した。そして、推定した母集団からサンプルをランダムに抽出し、微分幾何学的手法に基づき各種解析を行った<sup>4</sup>。

### 3.2.3 太陽電池の搭載能力調査結果

屋根面積および曲率の関係から太陽電池が被覆可能な面積のヒストグラムと曲面補正係数のヒストグラムを図 3.2-1 に示す。被覆可能かどうかの判定は、便宜的に、曲率半径 1 m の球面よりも

大きな平均曲率をとる領域は搭載不適と見なした。また、傾斜が急で年間発電量が平面比で 50%を下回る領域も搭載不適と見なした。曲面補正係数は、同数のセルを平坦面に並べたときの年間に受光する日射量の比率であり、平面に被覆したときは 1、曲面の曲がり具合が大きくなると小さくなり、車体屋根が平面太陽電池と比べどの程度の割合の有効日射量を受けるかの指標となる<sup>15,16</sup>。

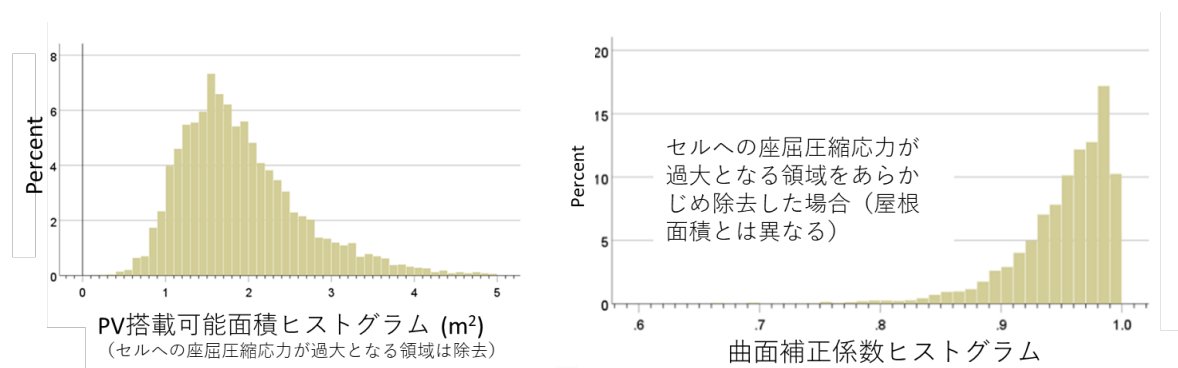


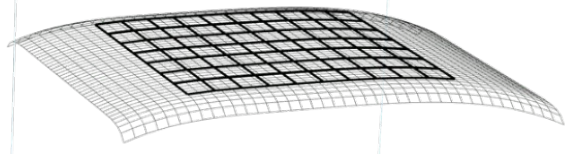
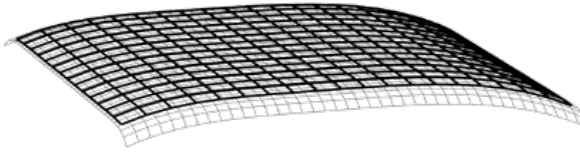
図 3.2-1 太陽電池が被覆可能な面積と曲面補正係数のヒストグラム

メジアン値で見積もった場合、屋根面積としては 2 m<sup>2</sup>、太陽電池被覆可能な領域の面積としては 1.9 m<sup>2</sup> とみられる<sup>14</sup>。

実際には、曲率が高い部分でも被覆できるかどうかはセルの面積に関係し、また、必ずしも車幅がセル幅の倍数であるとは限らないことから、セルとセルとの隙間がデッドエリア化するため、そのような制約も考慮した。例として、標準サイズ (166 mm×166 mm) の結晶 Si セルおよびそのクォーターカット品で被覆した場合を比較した結果を表 3.2-1 に示す。

カットセルを使うことにより、曲率の大きい箇所へも配置できるようになり、ストリング数も増えるため、曲面への不均一太陽光照射による mismatching 損失も低減することができる。その一方で、セル隙間のデッドエリアが増えることから、被覆能力に応じた被覆率が得られるわけではなく、カット数を増やしても必ずしも発電量が増すわけではないことに注意が必要である。

表 3.2-1 標準的な車体屋根曲面への各種サイズセルの被覆設計および発電性能

	
166mm×166 mm フルサイズ	166mm×166 mm 1/4 カット
2 ストリングス	8 ストリングス
セル被覆率 : 83.3%	セル被覆率 : 90.8%
年間発電量 (平面比) : 82.1%	年間発電量 (平面比) : 87.4%

所定の車体曲面に対し、どのような形状・サイズのセルを、どう配置するか (どう配線するか) は発電性能に大きく影響する。今後、電費性能向上のため、空力性能を強化した車体も普及し始

めると考えられる。このような場合も、最適なセル形状および配置設計を導く設計手法（例えば、単純な最適化手法ではなく対話型設計シーケンス）が重要な課題となるであろう。

### 3.2.4 課題と展望（車体形状の統計的把握と発電量への影響）

- 屋根以外への車体（3次元曲面）被覆
  - 今後、車載太陽電池の容量を増やそうとした場合、最も効果的なのが屋根以外への車載太陽電池搭載である。屋根の場合、ダブルバルブ車体のような例外はあるものの、概ね、凹面を含まない単純凸面であるので微分幾何学による扱いは容易である。しかしながら、例えば、エンジンフード上に被覆しようとした場合、フロントウインドウによる影等、隠面が発生するので、扱いは単純ではない。車体側面を被覆した場合も、路面反射光を正確にモデル化する必要が出てくる。いずれにせよ、煩雑にはなるが、計算不能ではないので、定量モデル化の可能性は十分にある。
- 最適配置、最適ストリング分割問題
  - 車体形状に伴いミスマッチング損失の発生は避けられないが、部分日影、動的日影の作用は、図 3.1-1 に示したように、停車しているか、動いているか、車体曲面の深さはどの程度かなどにより、さらに、これらの状態をどのように重みづけるかなどにより大きく異なるため、これに対する最適なストリング構成も異なってくる。つまり、これらをバランス良く勘案した最適分割方法が必要になるが、現時点では現実的な解決方法が見つかっていない。
- 曲面モジュール試験方法
  - 曲面太陽電池には平面であることを前提とした太陽電池の試験方法を適用することはできない。曲面モジュールのための各種試験方法についての国際合意が必要である（従来方法の試験結果に対する補正方法を含む）。本件についても、日本主導で協議および試験結果のレベル合わせ（ラウンドロビン）が進められている<sup>9</sup>。

### 3.3 曲面モジュールの実証

自動車の車体は空気抵抗低減やデザイン性の観点から3次元曲面であるため、車体を太陽電池セルで被覆する際には太陽電池セルに曲げ応力が発生する。この応力がセルの破壊強度を超えるるとセルが割れてしまい、発電性能および信頼性の低下につながる恐れがある。自動車搭載用途ではこのような破壊リスクを低減するための方策が新たに求められる。そこで、3次元曲面の太陽電池モジュールの設計方法を検討し、実際に曲面モジュールを試作した<sup>17</sup>。

#### 3.3.1 曲面モジュールの試作

様々な太陽電池が実用化あるいは開発段階にあるが、ここでは現在最も普及している単結晶 Si 太陽電池セルを用いた。単結晶 Si は脆性材料であり、割れやすい性質がある。まず、セルの破壊強度（どれくらいの応力で破壊するか）を明らかにするため、曲げ試験を実施した。次にシミュレーション（有限要素法解析）により、曲面にセルを押し付けた際のセル応力を推定した。その際、セルの形状・サイズを変えてセル応力との関係性を調査した。これらの結果から、任意の曲面に対して破壊リスクが小さいセル形状を推定できるようにした。

この手法により設計・試作した曲面モジュールの写真と EL 検査画像を図 3.3-1 に示す。曲率半径 1 m および 1.5 m の球面を 50 cm 角に切り出した形状であり、3次元曲面である。一般乗用車の車体の曲率半径は 1~3 m 程度とみられているが、検証のために、あえてきつめの曲面を設定した。この曲面に対してほぼ 3 インチの正方形セルを使用した（通常の太陽電池モジュールで使われているセルの約 1/4 の面積）。これは、前述の設計手法で破壊リスクが小さいと判定された形状・サイズである。結果として、EL 検査画像が示すように、セル割れの無い曲面モジュールを試作することができた。曲率半径 1 m の場合はラミネート工程でセル割れが生じたが、加熱温度条件を調整することにより解消した。

以上のように、使用セルの曲げ試験、応力解析に基づく設計手法によってセル破壊リスクの小さい曲面モジュールを製作できることを確認した。セルの種類が変わっても基本的には同様の手法を適用できるものと考えられる。実用面では後述の信頼性評価項目をクリアする必要があり、従来の固定設置の太陽電池モジュールで培った信頼性向上技術をベースとして、車載で求められる耐久性を確保する必要がある。

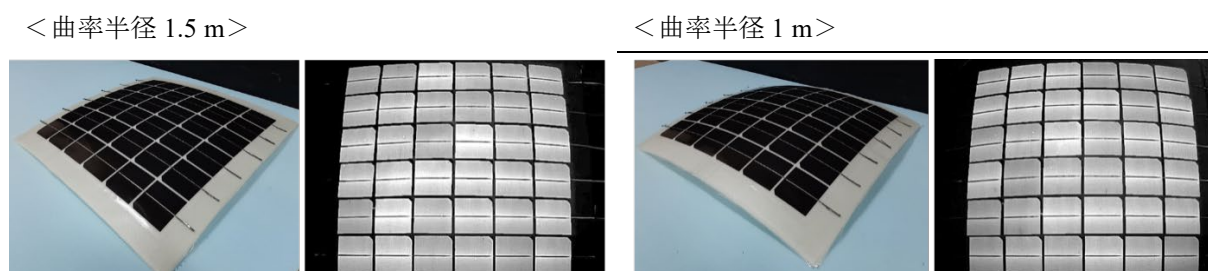


図 3.3-1 試作した 3 次元曲面モジュールの写真および EL 検査画像<sup>17</sup>

#### 3.3.2 試作した曲面モジュールの発電性能

試作した曲面モジュール（曲率半径 1.5 m）を用いて屋外で発電性能試験を行った<sup>18</sup>。

図 3.3-2 に示すように、曲面モジュールを同じセル構成の平面モジュールと並べて水平に設置し、晴天日（4 月）の発電量を計測した。



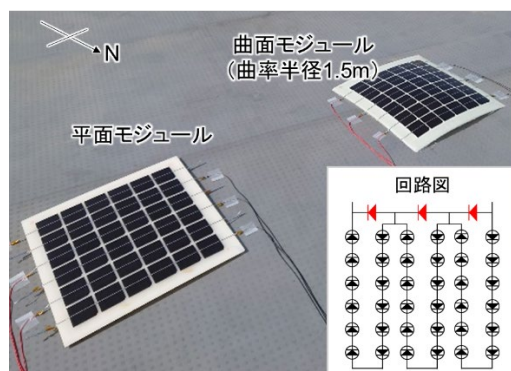


図 3.3-2 3次元曲面モジュールの発電性能試験の様子<sup>18</sup>

図 3.3-3 は、4月の晴天日における発電量の計測結果である。平面モジュールに対する曲面モジュールの発電量（最大出力）の比を見ると、直達日射が傾く朝と夕に曲面モジュールの発電量が相対的に低下している。これは 3.2 で述べた自己影の影響である。すなわち、曲面モジュール内の各セルが受ける日射量に差が生じ、日射量が少ないセルの電流に律速されたためである。この結果より、3.2 で述べた曲面における不均一太陽光照射による電流のミスマッチング損失を確認できた。曲面への適用では、この損失の把握と低減の工夫（istring数やバイパスダイオードなどの最適化）が必要である。

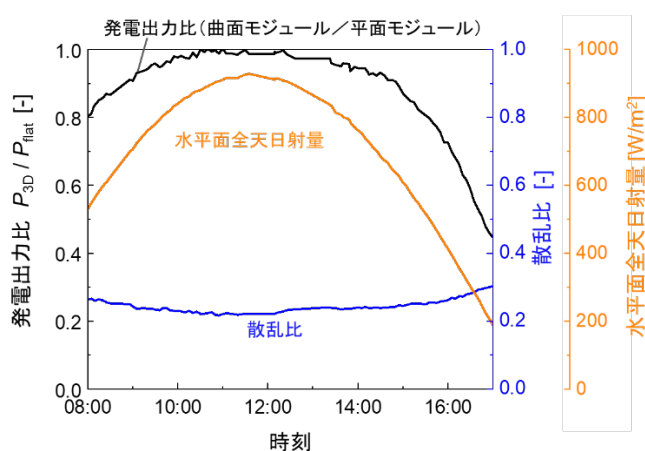


図 3.3-3 3次元曲面モジュールの発電性能試験の結果（4月の晴天日）<sup>18</sup>

### 3.3.3 自動車ルーフ設置時の温度変化

自動車の場合は太陽電池モジュールの温度変化にも注意が必要である。時速 50 km では約 14 m/s の風速に相当し、通常の固定設置のモジュールよりも風速のレンジと時間変化率が大きい。また、停車時の自然対流と走行時の対流伝熱とでは熱伝達率が大きく異なるため、モジュールの温度変化が大きくなる可能性が高い。

そのような影響を調べるため、図 3.3-4 に示すように実車（セダンタイプ）のルーフに太陽電池モジュール（フレキシブル型）を貼り付けて温度変化を計測した<sup>19</sup>。



図 3.3-4 自動車ルーフに貼り付けた太陽電池モジュール<sup>19</sup>

この車両を用い、10月の晴天日において、日射遮蔽物がほとんど無い駐車場で3時間（10:30～13:30）停車した後、一般道で90分間走行した際のモジュール表面および裏面に取り付けた熱電対の温度データを図3.3-5に示す。駐車時にモジュール温度は65℃近くまで上昇したが、走行を開始すると対流による熱伝達が促進されて急激に低下している。信号等の交通状況によって不定期に停車しており、停車の度にモジュール温度（とくに表面温度）が上昇し、発車とともに下降していることがわかる。温度変化率は最大で約8℃/min、平均で約2.5℃/minであった。これはIEC 61730-2「太陽電池（PV）モジュールの安全適格性確認- 第2部：試験に関する要求事項」で規定されている温度サイクル試験の温度変化率（最大100℃/h）よりも大きく、信頼性試験において留意が必要であることが示された。今回の実験では車体のルーフ形状・位置によっても対流熱伝達率が異なることも示された。

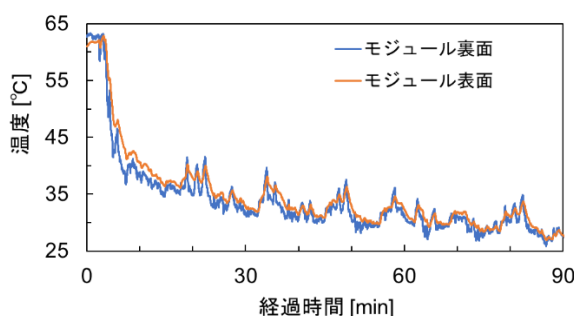


図 3.3-5 自動車ルーフに貼り付けた太陽電池モジュールの温度変化（10月の晴天日）<sup>19</sup>

### 3.3.4 課題と展望

自動車ルーフに搭載した太陽電池モジュールはプリウス PHEV 等で製品化がなされており、信頼性に関する問題は報告されていない。モジュールの表面材料としてはガラスが用いられており、曲率も小さい。今後は3.2でも述べたようにルーフ以外への搭載が考えられるが、軽量化、衝撃吸収、形状対応などの観点から樹脂の使用も考えられる。車体各部（ルーフ、ドア、ボンネット、ガラス等）に求められる要求・特性、それに対応するモジュールの材質・構造、低コスト量産技術の確立が課題となる。また、車載特有の環境や仕様がモジュールおよび周辺機器の長期信頼性に及ぼす影響を推定する必要がある。さらに、自動車においては通常の太陽電池モジュール以上にデザインや質感が求められるため、可飾性を高めるカラーリング技術等の開発も課題となる。

### 3.4 地上用太陽電池に関する規格と自動車規格との比較

車載太陽電池は、建物屋根や地上などに設置される一般型の太陽電池とは異なる使用環境に晒されるため、耐久性や信頼性に対する要求が異なることが想定される。そこで、車載太陽電池がクリアすべきと考えられる信頼性評価項目を調査・検討し、これらを従来太陽電池の評価項目と対比させ、車載太陽電池に固有の評価項目を明らかにした<sup>20</sup>。

#### 3.4.1 比較を行った規格

車載太陽電池は地上用太陽電池と自動車部品（電気電子機器、ガラス）の二つの側面を持っていることを想定し、これらの使用環境を想定した信頼性評価試験を規定している以下の国内外の規格（ISO、IEC、JIS、JASO）を調査した。

なお、各規格の詳細については、規格文書を参照頂きたい。

#### 地上用太陽電池に関する規格

- **IEC 61730-2:2016**, Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing  
(**JIS C 61730-2:2020**, 太陽電池 (PV) モジュールの安全適格性確認－第 2 部：試験に関する要求事項)
- **IEC 61215-2:2016**, Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures  
(**JIS C 61215-2:2020**, 地上設置の太陽電池 (PV) モジュール－設計適格性確認及び型式認証－第 2 部：試験方法)
- **IEC 61701:2020**, Photovoltaic (PV) modules – Salt mist corrosion testing
- **IEC 62716:2013**, Photovoltaic (PV) modules – Ammonia corrosion testing

#### 自動車部品に関する規格

- **ISO 16750-2:2012**, Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 2: Electrical loads  
(**JASO D 014-2:2014**, 自動車部品－電気・電子機器の環境試験及び機能確認試験－第 2 部：電気負荷)
- **ISO 16750-3:2012**, Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 3: Mechanical loads  
(**JASO D 014-3:2014**, 自動車部品－電気・電子機器の環境試験及び機能確認試験－第 3 部：機械負荷)
- **ISO 16750-4:2010**, Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 4: Climatic loads  
(**JASO D 014-4:2014**, 自動車部品－電気・電子機器の環境試験及び機能確認試験－第 4 部：気候負荷)
- **ISO 16750-5:2010**, Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 5: Chemical loads  
(**JASO D 014-5:2014**, 自動車部品－電気・電子機器の環境試験及び機能確認試験－第 5 部：

化学負荷)

- JASO D 902:2012, 自動車部品－電子機器－耐久性試験方法
- JIS R 3212:2015, 自動車用安全ガラス試験方法

### 3.4.2 地上用太陽電池と自動車部品に関する規格の比較結果

表 3.4-1 に地上用太陽電池および自動車部品の信頼性評価項目を機械負荷、気候負荷、電気負荷、化学負荷に分類して示す。ここでは、基本性能維持を目的としている試験項目のみをまとめており、故障等に起因する火災・感電や衝突に対する乗員・歩行者の安全保護に関する項目は含まれていない。表中には、各信頼性評価試験が規定されている規格内の試験番号もしくは章番号を記しているが、規格全体を参照する試験については“○”を記している。また、評価項目のうち、地上用太陽電池のみ、自動車部品のみ、これら両方で規定されているものをそれぞれ緑色、赤色、青色の文字で示している。

表 3.4-1 地上用太陽電池と自動車部品の信頼性評価項目

負荷種別	評価項目	地上用太陽電池					自動車部品							
		IEC 61730	IEC 61215	IEC 61701	IEC 62716	ISO 16750								
						-2	-3	-4	-5	JASO D902	JIS R 3212			
機械	表面強度	MST 12					4.4							
	降雹(ひょう), 鋼球落下		MQT 17											5.4
	静的荷重	MST 34	MQT 16											
	振動						4.1				6.4			
	機械的衝撃						4.2							
	砂利衝撃						4.5							
	一定温度	MST 37, 55, 56						5.1						5.19
	高温高湿定常	MST 53	MQT 13					5.7			6.3			5.10
	温度サイクル	MST 51	MQT 11					5.3.1						
	温湿度サイクル(結露)	MST 52	MQT 12					5.6						
気候	耐日射(UV)	MST 54	MQT 10					5.9						5.17
	屋外暴露		MQT 08											
	塩水噴霧			○					5.5					
	アンモニア噴霧				○									
	熱衝撃								5.2, 5.4		6.2			
	混合ガス流腐食								5.3.2					
	混合ガス流腐食								5.8					
	ホットスポット耐久	MST 22	MQT 09											
	電磁両立性						4.13							
	化学											○		5.15

表面強度、降雹（ひょう）／鋼球落下、熱荷重（一定温度、高温高湿定常、温度サイクル、温湿度サイクル）、耐日射、塩水噴霧の試験は、地上用太陽電池と自動車部品の両方で規定されている。どちらの規格の条件が車載太陽電池の試験に適しているかについては詳細な検討が必要であるが、熱負荷については表 3.4-2～5 に示すように、概ね地上用太陽電池の方が厳しい条件で試験されているようである（該当する規格が複数ある場合は最も条件が厳しいもののみを記載）。表中では、試験条件がより厳しい方の数値を赤字でハイライトしている。

表 3.4-2 一定温度試験

規格	太陽電池	自動車部品
	IEC 61730-2 (MST 55, 56)	ISO 16750-4 (5.1)
低温温度	-40°C	-40°C
低温保持時間	48 h	24 h
高温温度	105°C	85°C
高温保持時間	200 h	96 h

表 3.4-3 高温高湿定常試験

規格	太陽電池	自動車部品
	IEC 61730-2 (MST 53)	ISO 16750-4 (5.7)
温度	85±2°C	85±2°C
相対湿度	85±5%	85±5%
保持時間	1000 h	1344 h

表 3.4-4 温度サイクル試験

規格	太陽電池	自動車部品
	IEC 61730-2 (MST 51)	ISO 16750-4 (5.3.1)
下限温度	-40°C	-40°C
上限温度	85°C	80°C
下限－上限温度間の変化率	最大 1.67°C/min	最大 1°C/min
サイクル数	200	30

表 3.4-5 温湿度サイクル（結露）試験

規格	太陽電池	自動車部品
	ISO 16730-2 (MST 52)	ISO 16750-4 (5.6.3)
下限温度	-40°C	25°C
上限温度	85°C	80°C
相対湿度@上限温度	85±5%	≥95%
サイクル数	10	5



一方で、振動（悪路走行によってボディーに誘起される振動）、機械的衝撃（ドアを乱暴に閉める際や高速で縁石を乗り越える際に発生する衝撃負荷）、砂利衝撃、熱衝撃（急激な速度変化や跳ね水による極めて短い時間での温度変化）、混合ガス流腐食、電磁両立性、化学負荷は自動車部品のみで規定されており、これらが車載太陽電池固有の信頼性評価項目になると考えられる。特に、振動、機械的衝撃、熱衝撃のような時間変化率が極めて大きい負荷が繰り返し印加される環境条件は地上用太陽電池では想定されておらず、車載太陽電池がより過酷な環境に晒されることがわかる。例えば、ISO 16750-3 で規定されている機械的衝撃試験では、6 ms の間にピーク加速度  $500 \text{ m/s}^2$  の正弦波パルスを印加し（ボディー上の取付機器の場合）、JASO D 902 で規定されている熱衝撃試験では、5 min 以内に温度を $-40^\circ\text{C}$ から  $85^\circ\text{C}$ に変化させる。これは表 3.4-4 に示す温度サイクル試験の 15 倍以上の温度変化率に相当する。

### 3.4.3 今後の展望

以上の取り組みから車載太陽電池がクリアすべきと考えられる信頼性評価項目が明らかになった。今後は、想定する耐用年数や試験コスト等を考慮した合理的な試験方法の策定に向けて、考慮すべき試験項目や優先順位、試験条件（サンプル数、厳しさ等）、合格基準について、関係機関、自動車メーカー、太陽電池メーカーと協議して検討を進める予定である。また、衝突時の乗員・歩行者の保護、火災・感電への対策、材料の毒性の影響等、モジュールの安全設計要求も調査する予定である。

### 【第3章 参考文献】

---

- <sup>1</sup> K. Araki, et al. : "To do list for research and development and international standardization to achieve the goal of running a majority of electric vehicles on solar energy", *Coatings* 8.7 (2018): 251.
- <sup>2</sup> K. Araki, et al. : "The outdoor field test and energy yield model of the four-terminal on Si tandem PV module", *Applied Sciences* 10.7 (2020): 2529.
- <sup>3</sup> Y. Ota, et al. : "Evaluating the output of a car-mounted photovoltaic module under driving conditions", *IEEE Journal of Photovoltaics* 11.5 (2021): 1299-1304.
- <sup>4</sup> Y. Ota, et al. : "Curve correction of vehicle - integrated photovoltaics using statistics on commercial car bodies", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 30.2 (2022): 152-163.
- <sup>5</sup> K. Araki, Y. Ota, and M. Yamaguchi : "Measurement and modeling of 3D solar irradiance for vehicle-integrated photovoltaic", *Applied Sciences* 10.3 (2020): 872.
- <sup>6</sup> Y. Ota, et al. : "A mobile multipyranometer array for the assessment of solar irradiance incident on a photovoltaic-powered vehicle", *Solar Energy* 184 (2019): 84-90.
- <sup>7</sup> K. Araki, et al. : "Rough and straightforward estimation of the mismatching loss by partial shading of the PV modules installed on an urban area or car-roof", 46<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2019.
- <sup>8</sup> K. Araki, et al. : "How did the knowledge of CPV contribute to the standardization activity of VIPV?", *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2298. No. 1. AIP Publishing LLC, 2020.
- <sup>9</sup> K. Araki, et al. : "Modeling and Standardization Researches and Discussions of the Car-roof PV through International Web Meetings", 46<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2019.
- <sup>10</sup> K. Araki, et al. : "Standardization of the CPV and car-roof PV technology in 2018—Where are we going to go?", *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2012. No. 1. AIP Publishing LLC, 2018.
- <sup>11</sup> K. Araki, et al. : "Toward the Standardization of the Car-roof PV—The challenge to the 3-D Sunshine Modeling and Rating of the 3-D Continuously Curved PV Panel", 7<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A joint conference of 45<sup>th</sup> IEEE PVSC, 28<sup>th</sup> PVSEC & 34<sup>th</sup> EU PVSEC), 2018.
- <sup>12</sup> H. Tawa, et al. : "Accurate output forecasting method for various photovoltaic modules considering incident angle and spectral change owing to atmospheric parameters and cloud conditions", *Applied Sciences* 10.2 (2020): 703.
- <sup>13</sup> K. Araki, et al. : "The outdoor field test and energy yield model of the four-terminal on Si tandem PV module", *Applied Sciences* 10.7 (2020): 2529.
- <sup>14</sup> Y. Ota, et al. : "Facilitating vehicle-integrated photovoltaics by considering the radius of curvature of the roof surface for solar cell coverage", *Cleaner Engineering and Technology* 7 (2022): 100446.
- <sup>15</sup> K. Araki, et al. : "Curve correction of the energy yield by flexible photovoltaics for VIPV and BIPV applications using a simple correction factor", 46<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2019.
- <sup>16</sup> Ota, Yasuyuki, et al. "Curve-correction factor for characterization of the output of a three-dimensional curved photovoltaic module on a car roof." *Coatings* 8.12 (2018): 432.
- <sup>17</sup> N. Yamada : "Development of 3D curved photovoltaic modules", *JSAP Review*, Vol. 2022 (2022). <https://doi.org/10.11470/jsaprev.220402>
- <sup>18</sup> Y. Hayakawa, M. Baba and N. Yamada : "Effect of bypass diode on power generation of 3D curved Si photovoltaic module", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 12, Issue 1 (2022). <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3119254>
- <sup>19</sup> Y. Hayakawa, D. Sato and N. Yamada : "Measurement of convective heat transfer coefficient and temperature of vehicle-integrated photovoltaic module", *Energies*, Vol. 15, No. 13 (2022). <https://doi.org/10.3390/en15134818>
- <sup>20</sup> D. Sato, K. Araki, M. Tanaka and N. Yamada : Review of reliability assessment for automobile components and terrestrial PV modules towards standardization of vehicle-integrated PV, 31<sup>st</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-31), 14 December 2021.

## 第4章 まとめ

太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向け、国内外で様々な動きが見られ始めている。

本報告書では、太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向を概観するとともに、日本で実施されている、定格出力 1 kW 規模の超高効率太陽電池を利用した太陽光発電システム搭載自動車の実証走行により得られている結果を示した。また、今後の本格的実用化に向けた基盤となる、車両に搭載した太陽電池が取得できる日射量や発電量の特徴把握、太陽電池に求められる性能やその評価方法に係る取り組み状況を整理した。

以下に、前章までに示された知見を総括するとともに、今後の展望と課題、取り組みを示す。

### 4.1 得られた知見

#### 4.1.1 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向

乗用車への太陽電池搭載は古くは車内換気用で始まったが、今では発電電力が駆動用（車両走行）に利用されるようになった。近年では、太陽電池出力の増強に加え、商用車などにも太陽電池利用の幅が広がってきている。

- ・ 太陽電池を搭載し、発電電力を走行に用いる太陽光発電システム搭載自動車は、2017 年に販売が開始されたプリウス PHEV において、世界で初めて量産化された。太陽電池のみで走行することはできないものの、その後も、出力 200 W 程度の太陽電池を搭載し、発電電力を走行に利用する太陽光発電システム搭載自動車が発表、市場投入され始めている。
- ・ 走行用の電力をできるだけ多く太陽電池によって賄うため、効率 30%超の太陽電池を屋根やボンネットに敷き詰めた、出力 1kW 規模の太陽光発電を搭載する自動車（乗用車）への取り組みも開始されている。日本では NEDO による実証車が開発され、2019 年より実証走行が実施されているが、欧州ではベンチャー企業が早期の市場投入を目指して取り組んでいる。
- ・ 乗用車への取り組みに加え、欧米では近年、商用車両への太陽電池搭載も見られ始めている。トラック・トレーラーなど大型車両では太陽光発電電力の冷蔵・冷凍用電力としての利用、小型車両では、乗用車と同様に太陽光発電電力を走行に利用することが試みられている。

#### 4.1.2 太陽光発電システム搭載自動車の実証走行

太陽光発電システム搭載による効果は、太陽電池出力や車両の走行パターン、走行・駐車環境のほか、車種によっても異なってくる。実証走行試験は現在も継続的に実施されており、今後も様々な結果や課題が見出されてくるが、これまでの結果から以下の知見が得られている。

##### (1) プラグインハイブリッド自動車（太陽電池出力：860 W）の実証走行

- ・ 高速道路を中心に午前・午後にそれぞれ 35 km 走行するパターンにおいて、車両走行電力消費率は約 10.1 km/kWh と計測された（主に名古屋市で実施）。
- ・ 日中駐車時に車載太陽電池による充電が行われ、午前走行時の消費電力が補われる。2020 年 6 月の計測日（晴天日）の太陽光発電電力量は約 4 kWh/日で、この電力により 30 km/日の走行が可能であることが実証走行により確認された。
- ・ また、2021 年 9 月の計測において、車両に取り付けた日射計で測定された日射量と走行距離の相関を見ると、太陽光発電電力による走行距離と 1 日当たり日射量は比例関係にあり、その

定数は 5.9 km/(kWh/m<sup>2</sup>/日)であった。季節による電力消費率の変化を考慮する必要はあるが、例えば、東京の年間日射量は約 1,200 kWh/m<sup>2</sup>/年であり、860 W の太陽電池を車載することにより、計算上では年間約 7,080 km の走行が可能ということになる。

## (2) 電気自動車（太陽電池出力：1,150 W）の実証走行

- ・ 公道走行による電力消費率実績（6 km/kWh 程度）と、日射量データベースに基づく発電量推計（横浜市を想定）により、太陽光発電による走行可能距離は年間 7,100 km となる。季節による発電量や電力消費量の違いにより、太陽光発電電力による冬の走行可能距離は、夏と比較すると半分程度となる。
- ・ 走行パターンとして平日の通勤利用を想定し、実証走行による太陽光発電電力量、電力消費率および走行距離から充電頻度を算出したところ、通勤距離が片道 10 km の場合は充電不要、片道 25 km の場合にも年間充電回数を 52%程度低減可能であることが示された。一方、走行しない休日の日中等にバッテリー電力貯蔵量（SOC）が 100%となる場合もある。これは太陽光発電電力が余剰であることを意味し、太陽光発電出力や電力用途（外部への給電等）の最適化が検討課題として挙げられる。
- ・ 走行中に車両にかかる影に対し、発生頻度が多いと考えられる前後方向に流れる影への対策として、車両横方向（走行方向に対して垂直）をセルの直列方向とすることでモジュール電圧を維持し、モジュール電流の低下による発電電力の低下を低減することができる。
- ・ 日影と日向を繰り返すような条件においては、MPPT 制御探索開始電圧を高くすることにより、MPPT 制御の応答性が向上し、MPPT 電圧が 38 V 程度の場合、探索開始電圧を 20～35 V にすることで、MPPT 達成率が 97%以上にすることが可能となる。

### 4.1.3 太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組み

自動車に搭載される太陽電池は一般的な固定設置型とは様々な相違がある。そこで、日影による影響、非平面性、環境試験の観点による相違の把握、相違に起因する課題の解決に向けた取り組みが実施されている。

- ・ 自動車屋根に搭載した太陽電池の発電量は、車両屋根の日射量、すなわち、走行中に影を生じさせる建物などの方位や仰角分布などの影響を受ける。これらの影響の度合いは、地域（地理的な立地）による相違は小さく、走行する街区の日射環境が大きな影響を及ぼす。例えば、住宅地における車両屋根面の日射量は、定置水平面日射量の 7 割程度となる。
- ・ 車体の屋根曲面にどのような形状・サイズのセルをどのように配置（配線）するかは、発電性能に大きく影響する。標準的な乗用車屋根曲面を想定すると、166 mm 角の結晶 Si セルによる被覆率は屋根面積の 83.3%、年間発電量は平面と比較して 82.1%と見積もられる。また、同サイズの 1/4 カットセルを想定すると被覆率は 90.8%、年間発電量は平面比 87.4%と向上する。今後、空力性能なども考慮した最適なセル形状および配置を導く設計手法が重要となる。
- ・ 3次元曲面である車体屋根に太陽電池を被覆する際には、太陽電池セルに曲げ応力が発生するが、使用するセルの曲げ試験、応力解析に基づく設計手法を用いることで、セル破壊リスクの小さい曲面モジュールを製作することが可能である。ただし、朝夕の自己影の影響や不均一太陽光照射による電流のミスマッチ損失が生じる可能性があり、損失の把握と低減に工夫が必要となる。また、走行・停車の繰り返しによる温度変化サイクルは、太陽電池モジュールに係

る温度サイクル試験の温度変化率よりも大きくなることもあり、留意が必要である。

- ・ 一般的な地上用太陽電池と自動車部品の規格における信頼性評価の項目を見ると、表面強度、降電/鋼球落下、熱荷重等の試験は双方に規定されているが、振動、機械的衝撃、熱衝撃、化学負荷などは自動車部品のみで規定されている。車載太陽電池に必要とされる評価項目を具体的に特定するとともに、合理的な試験方法等に関する取り組みを進めることが必要である。

## 4.2 今後の展望と課題

2050年のカーボンニュートラルに向け、運輸部門へのニーズは大きく、中でも自動車部門における取り組みが非常に重要となる。IEAの'Net Zero by 2050'<sup>1</sup>によれば、2050年の運輸部門におけるエネルギー消費量は2020年より20%以上削減、かつ、45%が電力とされている。また、2050年のエネルギー消費量の6割程度は自動車部門によるものである。このNet Zero by 2050の達成に向け、2050年には販売されるほぼすべての自動車が電動化され、2030年時点における電動車両の累積量は350百万台を上回っている必要があるとされている<sup>2</sup>。IRENA<sup>3</sup>は、2050年における運輸部門のエネルギー消費量のうち、電力の占める割合は49%、電動車両の普及台数は1,890百万台としている。さらに、再生可能エネルギー（脱炭素）発電に関する見通しとして、米国DOEでは、2050年における発電設備容量を3TW（うち、太陽光発電は1.6TW）、電力用途（供給先）の約20%を運輸部門としている<sup>4</sup>。

このような見通しにおいて、太陽光発電システム搭載自動車がどのように位置づけられているかは定かではないが、日本のほか、欧州や米国でも太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた取り組みはすでに始まっている<sup>5,6,7</sup>。太陽光発電システム搭載自動車は、走行用電力を太陽光発電から直接供給することによるCO<sub>2</sub>排出削減効果に加え、電気自動車普及の阻害要因の一つとされる充電頻度を低減することが可能となり、ユーザーにとっての利便性を改善することができる。

公道における実証走行をはじめ、様々な技術開発により、太陽光発電システム搭載自動車による効果や課題が実フィールドにおいて確認・検証され、様々な知見が得られているが、太陽光発電システム搭載自動車の本格的実用化に向けては、表4.2-1のような取り組みをさらに加速させていく必要がある。

市場における普及を目指すためには、ユーザーにとってのメリットを訴求し、それを高めていくことが重要となり、実証走行による検証が必要である。個人ユーザーの拡大のみならず、地方自治体による積極的な利用や政府も含めた政策的な位置づけにつなげていくことも重要と考えられる。CO<sub>2</sub>排出削減効果のような環境対策のほか、近年では防災対策などのレジリエンスも重要視されており、太陽光発電システム搭載自動車による効果・貢献が期待される。また、ユーザーの幅を広げていくためには太陽光発電を搭載する自動車アプリケーションの多様化も考えられる。

太陽光発電の性能という点では、システム効率の向上や余剰電力が生じた場合の有効利用によって発電電力利用効率を向上させていく必要があり、高い利用効率を維持するためのシステム設計も重要となる。太陽電池という部品を車体に組み込む際の太陽光発電出力の最大化（所与の日射エネルギーから最大の発電量を取得）、車両の重量や安全性なども考慮した表面カバーや裏面基材等の材料選択なども重要となる。また、ユーザーの嗜好に応える意匠性も重要となり、発電性能や材料選択において考慮すべき要素である。そして、このような性能や条件を満たす製品を安全かつ安定的に供給していくための性能の評価、試験方法を標準化していくことも必要である。

表 4-1 太陽光発電システム搭載自動車の本格的実用化に向けた課題と取り組み

太陽光発電システム搭載自動車による効果の検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・太陽光発電電力による走行可能距離の定量化</li> <li>・走行パターンや環境に応じた効果の計測・分析と特徴の把握（CO<sub>2</sub>排出削減効果、充電頻度低減効果）</li> <li>・効果の向上に向けた方策の検討</li> <li>・新たな価値や効果の提案（レジリエンスなど）</li> <li>・太陽電池搭載アプリケーションの多様化（軽乗用車、小型商用車、大型トラック・トレーラー、バスなど）</li> </ul>
太陽光発電電力の利用効率の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・駆動用電力としての利用率の最大化（太陽電池から駆動用蓄電池までの回路・システム内損失の低減）</li> <li>・蓄電池フル充電時（SOC=100%）における太陽光発電電力の有効利用（外部への供給：V2X）</li> <li>・太陽光発電出力も含めたシステム設計の最適化</li> </ul>
太陽電池の車体への組み込み方の検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車両屋根等への太陽電池被覆の最適化（取得日射量最大化、曲げ応力耐性などの3次元曲面对応）</li> <li>・セル形状や配置、ストリング形成の最適化</li> <li>・モジュール構造、材料の最適化と意匠性の向上</li> </ul>
発電性能、安全性などの評価、試験方法の標準化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・エネルギー定格の標準化</li> <li>・日射量、発電量等の計測方法</li> <li>・曲面モジュールの電氣的、機械的性能の試験方法</li> <li>・自動車部品としての信頼性評価項目と評価、試験方法</li> </ul>

現在の太陽光発電市場は、中国をはじめとする海外勢に席卷されており、自動車分野においても、電動車両の開発に向けた取り組みが世界各国で活発化し、競争が激しくなっている。

日本は現在、IECにおける車両搭載太陽電池のエネルギー定格標準化に関する議論、IEA PVPSにおける太陽光発電システム搭載自動車の付加価値や技術要件に関する議論を主導している。このような機会を通じて、日本の取り組みを世界に発信し、存在感を高めていくことができる。

太陽光発電システム搭載自動車への取り組みは、緒に就いた段階ではあるが、太陽電池、電動車両の開発・製造を手掛ける企業やステークホルダーが一体となって取り組んでいくことで、太陽光発電システム搭載自動車の市場拡大を契機とした国内関連産業の活性化が期待される。

#### 4.3 今後の取り組みについて

以上の課題を解決していくため、今後も引き続き太陽光発電システム搭載自動車に関する検討を実施していく。

実証走行による課題抽出と解決策の検討、定量的な効果の検証を継続的に実施し、太陽光発電、自動車双方の視点において有用なデータの収集等に取り組んでいくとともに、太陽光発電システム搭載自動車の国際的な普及に資するため、国際貢献、標準化等につながる様々な技術開発を継続的に展開していく。



また、NEDO では、自動車をはじめとする移動体への搭載を想定した太陽電池技術開発を実施している。現在、市場において自動車に搭載されている太陽電池は結晶 Si 太陽電池であるが、限られた面積において高出力を実現する発電効率 35%以上の超高効率太陽電池、低コストかつ優れた曲面追従性、30%以上の発電効率が期待されるペロブスカイト/Si タンデム太陽電池は、移動体用太陽電池としての大きな可能性を秘めており、日本発の技術として世界に台頭していくことが期待される。

今後、これらの太陽電池の実用化も念頭に置き、太陽光発電システム搭載自動車の本格的実用化、国内関連産業の活性化につながる様々な取り組みを実施していく。

#### 【第 4 章 参考文献】

---

<sup>1</sup> IEA: Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021

<sup>2</sup> IEA: Global EV Outlook 2022, 2022

<sup>3</sup> IRENA: World Energy Transitions Outlook 2022, 2022

<sup>4</sup> B. Jones-Albertus: Technologies for a Solar-Powered Future, 49<sup>th</sup> IEEE-PVSC, Philadelphia, USA, June 2022

<sup>5</sup> ETIP/EERA: Strategic Research and Innovation Agenda for Photovoltaics, 2022

<sup>6</sup> EU: Solar Energy Strategy, 2022

<sup>7</sup> U.S.DOE: Challenges and Opportunities for Vehicle Photovoltaics, July 2022

## 「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」（所属は2023年1月末日時点）

本調査レポートはNEDO内に設置した太陽光発電システム搭載自動車検討委員会において検討した内容を取り纏めたものである。

### <委員（〇は委員長）（敬称略）>

- 〇西岡 賢祐 国立大学法人宮崎大学工学教育研究部環境・エネルギー工学研究センター 教授  
荒木 建次 国立大学法人宮崎大学工学部環境・エネルギー工学研究センター 特別教授  
伊藤 雅一 国立大学法人福井大学学術研究院工学系部門工学領域 准教授  
植田 譲 学校法人東京理科大学工学部電気工学科 教授  
奥村 健一 トヨタ自動車株式会社カーボンニュートラル先行開発センターCN 開発部  
CN 先行技術 PJT 推進室再エネ開発 G グループ長  
増田 泰造 トヨタ自動車株式会社カーボンニュートラル先行開発センターCN 開発部  
CN 先行技術 PJT 推進室再エネ開発 G 主幹  
高本 達也 シヤープ株式会社スマートビジネスソリューション事業本部  
化合物事業推進部 部長  
谷本 勉 日産自動車株式会社総合研究所 EV システム研究所 主任研究員  
廣田 壽男 学校法人早稲田大学電動車両研究所 招聘研究員  
松岡 亨卓 一般財団法人日本自動車研究所環境研究部電動技術グループ 主任研究員  
山口 真史 学校法人トヨタ学園豊田工業大学 招聘研究員・名誉教授

### （オブザーバー）

- 田中 誠 太陽光発電技術研究組合 技術部長

### <特別協力者>

- 国立大学法人 長岡技術科学大学

### <事務局>

- 山崎 光浩 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
新エネルギー部太陽光発電グループ 主任研究員  
吉柳 孝二 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
新エネルギー部太陽光発電グループ 主査  
福嶋 清 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
新エネルギー部太陽光発電グループ 専門調査員  
河本 桂一 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)サステナビリティコンサルティング第1部  
上席主任コンサルタント  
並河 昌平 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)戦略コンサルティング部  
上席主任コンサルタント  
桐原 貴大 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)サステナビリティコンサルティング第1部  
主任コンサルタント  
高津 尚人 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)サステナビリティコンサルティング第1部  
コンサルタント  
豊田 涼平 みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)サステナビリティコンサルティング第1部  
コンサルタント