



太陽光発電システム搭載自動車検討委員会
報告書
「太陽光発電システム搭載自動車の現状と今後の
展望」

2025 年 6 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報告書目次

はじめに

第1章 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向と期待される効果	1
1.1 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向	1
1.1.1 市場化等の動向	1
1.1.2 国内外における実用化・普及促進に向けた取組	5
1.2 太陽光発電システム搭載自動車による期待される効果	10
1.2.1 前提条件等	10
1.2.2 太陽光発電システム搭載自動車に期待される効果（車両1台あたり）	10
1.2.3 太陽光発電システム搭載自動車の普及による効果（シナリオ分析）	13
【第1章 参考文献】	15
第2章 太陽光発電システム搭載自動車の実証走行等から得られた知見	18
2.1 乗用車への太陽光発電搭載	19
2.1.1 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 ：発電電力量と走行可能距離、曲面を有する車載面の日射量・発電量の評価	19
2.1.2 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	27
2.2 商用車への太陽光発電搭載	38
2.2.1 電動商用車への太陽光発電搭載	39
2.2.2 内燃機関走行トラック・トレーラーへの太陽光発電搭載	47
2.3 乗用車搭載用太陽電池モジュールの信頼性評価	57
2.3.1 環境負荷試験項目の整理および留意点	57
2.3.2 自動車部品向け信頼性試験の実施	60
2.3.3 まとめ	63
2.4 車載太陽電池によるレジリエンス	64
2.4.1 レジリエンスシナリオ	64
2.4.2 車載太陽電池によるレジリエンス拠点としての効果	67
2.4.3 太陽光発電システム搭載自動車の余剰電力の融通量に応じた必要車両台数	68
2.4.4 まとめ	68
【第2章 参考文献】	69

第3章 まとめ（得られた知見と今後の課題・展望）	71
3.1 得られた知見	71
3.1.1 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向と期待される効果	71
3.1.2 太陽光発電システムを搭載した乗用車の実証走行	71
3.1.3 太陽光発電システムを搭載した商用車の実証走行	72
3.1.4 乗用車搭載用太陽電池モジュールの信頼性評価	73
3.1.5 乗用車への太陽光発電搭載によるレジリエンス効果	74
3.2 今後の課題と展望	74
3.2.1 今後の課題	74
3.2.2 今後の展望	76
【第3章 参考文献】	78
「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」	79

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。

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、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ⁱ、2020 年度に発足した「太陽光発電主力電源化推進技術開発」において、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や調査研究を推進している。

また、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 ㈱）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 CO₂ 排出量削減に貢献できる可能性などを示したⁱⁱ。続いて、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ⁱⁱⁱ。2023 年 2 月には、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、2019 年より開始している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^{iv}。

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し、普及により期待される効果を試算するとともに、太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向け、NEDO が中心となり実施してきている事業により得られている主要な成果の一部、ならびに今後の課題と展望を取りまとめたものである。

ⁱ 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）

ⁱⁱ 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）

ⁱⁱⁱ 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>）

^{iv} 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>）

^v 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（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）（<https://www.nedo.go.jp/content/100961854.pdf>）

第 1 章 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向と期待される効果

近年、世界中の国々が CO₂ 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、2023 年には 9,000 万台以上に増加している¹。また、全世界の自動車保有台数は 2022 年末に 16 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²。

自動車からの CO₂ 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 Electric Vehicle : PHEV と略す)、燃料電池車 (Fuel Cell Electric 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。特に、2022 年以降には石油依存に対する経済安全保障上のリスク回避、低コスト化を背景として、BEV の新車販売台数が増加しており、2022 年は前年比+54%、2023 年は前年比+35%となっている³。

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、CO₂ 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 CO₂ 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⁴。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および実用化に向けた取り組みの概略、ならびに太陽光発電システム搭載自動車の普及拡大により期待される効果の試算結果を示す。

1.1 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向

1.1.1 市場化等の動向

(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、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 (現在市販されているもの、開発中であるもののほか開発から撤退したものも含む) 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)	カテゴリー	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)	太陽電池 価格	ステータス*1
Prius (4 th) ⁵ (Toyota)	PHEV	180 W ⁶	8.8	1,510	—	—	288,000 円 ⁷	販売中 (2017 年～)
Prius (5 th) ⁸ (Toyota)	PHEV	(186 W) ²	51 (Ah)	1,570	6.6~8.9	—	286,000 円	販売中 (2023 年～)
Karma Revero ^{9,10} (Karma)	PHEV	200 W	28	2,296	—	—	—	販売中 (2020 年)
Sonata ¹¹ (Hyundai)	HEV	205 W	—	1,584 ~1,595	—	—	\$5,400 ^{*3}	販売中 (2020 年～)
bz4x ¹² (Toyota)	BEV	225 W ¹³	71.4	2,195 ~2,285	6.8~8.8	540~559	286,000 円	販売中 (2022 年～)
IONIQ 5 ¹⁴ (Hyundai)	BEV	205 W	58~72.6	1,870 ~2,100	7.0~7.6	498~618	\$3,000	販売中 (2022 年～)
Cybertruck ¹⁵ (Tesla)	BEV	現状は PV 搭載 無し	—	—	—	—	—	販売中 (2023 年～)
Vision EQXX ¹⁶ (Mercedes)	BEV	—	100	1,755	11.5	1,000~	—	—

*1: 2024 年 10 月時点 *2: 文献¹⁷より Prius (4th) モデルの太陽電池出力から推計

*3: 太陽電池を搭載するモデルと搭載しないモデルの価格差であり、純粋な太陽電池の価格差ではない点に注意

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。また、2023 年に販売開始された第 5 世代のプリウスでは、モジュール面積を 10%削減しつつ、効率が 15%改善したことを発表¹⁷している。その後、2020 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 はシャシーフレームに 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系統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。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 をそれぞれ開発していた。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) の太陽電池を搭載するモデルであった¹⁸。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する一方、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た¹⁹。しかし、Sono Motors は 2023 年 2 月に太陽電池搭載 BEV の開発計画を中断し、バス・トラック等の大型車両や乗用車向けに後付でも取付可能な PV キットを開発するソリューション企業へと転換した。また、Lightyear も Lightyear 0 の開発計画は中断し、後続機である Lightyear2 への開発に注力することが発表された。また PV 搭載自動車を販売していた Fisker 社は、EV 需要の鈍化に加え、同社が販売していた「Ocean」のソフトウェアに関連するリコールが発表されており、2024 年 6 月に連邦破産法第 11 条の適用を申請した。このように、近年では開発・販売の方針を転換したり、メーカーが生産から撤退する動きも見られるようになっており、特にベンチャー企業において市場化・量産化の課題に直面していることが考えられる。

(2) 大型車両への太陽光発電搭載

近年、前述の車載太陽電池キットを提供する企業へと転換した Sono Motors を始めとして、多くの企業でバス・トラック・トレーラーなどの大型車両（HDV：Heavy Duty Vehicle）への太陽光発電搭載に向けた開発が盛んとなっている。太陽光発電システムを搭載している大型車両の例を表 1.1-2 に示す。

物流大手 DHL からスピンアウトした英国 Trailar 社は薄膜 CIGS 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 でも採用が広まっており、2024 年 10 月現在、パートナー企業は 16 社にのぼっている。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²⁰。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。また、先述した Sono Motors は太陽光発電モジュールを搭載した車両開発のノウハウを活用し、バス等の HDV 搭載用のキットを開発しており、実際にハイブリッドバスへ導入し、実走行における導入効果を検証している。欧州の研究機関では、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。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。その他欧州では、スウェーデン、スイス、イタリア、イギリス等でも HDV の研究開発が行われている。中国では香港バスが BYD の BEV バスに太陽電池モジュールを導入しており、発電電力はバス内照明・空調システムに使用されており、モジュール無しの場合と比較して、電費の改善率は 5~8%になると見られる。

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㈱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 10%以上向上するとしている。同社は 2024 年 9 月に同ソリューションの商用化を開始する予定である。

国内企業の動向として、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²¹。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。

表 1.1-2 太陽光発電電力を利用する太陽光発電システム搭載自動車（大型車両）の例

事業者名	カテゴリ	開発国	太陽電池 容量	バッテリー 容量	導入効果
Trailer ^{22,23}	トレーラー バス トラック	英国	カテゴリにより異なる	導入する車両に依存	太陽電池 1.5kW を導入できるバスの場合は、年間で 4,800t-CO ₂ （燃料換算で 1.8kL）の削減が可能。
IM efficiency	トレーラー	オランダ	1 枚あたり 430W	～4kWh	年間で 1～3kL の燃料削減、また 3～9t の CO ₂ を削減可能。
ナガサキロジスティクス ²⁴	冷凍 トレーラー	日本	125W/ 枚 ×4 枚 ²⁵	不明	走行条件・使用車両等で変化するが、10%程度の燃費向上が可能。
PLM Fleet ²⁶	冷蔵 トレーラー	米国	不明	137 kWh	蓄電池単体では 14 時間以上の稼働が可能、PV 稼働時には 20 時間以上の稼働が可能。
Fraunhofer ISE ^{27,28}	トラック	ドイツ	3.5 kW	不明	トラック全体の使用エネルギーの 5～10%が充足可能。
香港バス、BYD	バス	中国	不明	不明 (航続 300km)	PV 由来の電力はバス内の照明・空調システムに使用され、電費改善率は 5～8%程度見込まれる。
Sono Motors	バス	ドイツ	1.4 kW	導入する車両に依存	ハイブリッドバスへの導入効果を実走行（実際の定期路線を走行）することによって検証中
Scania	トレーラー	スウェーデン	13.2 kW	300 kWh	当該発電システムの導入によって年間 8,000 kWh の PV による発電を予測
Peak Evolution	トラック	スイス オーストリア	7.4 kW	90 kWh	高高度登頂のために地面と屋根面に 4 枚常設し、地上に 16 枚のパネルを広げて充電。
Multitrax Volvo FOUR	トレーラー	イタリア	5.16 kW	540 kWh	荷台リフトの上下動のための動力として PV 電力を供給。
Capsolar	トレーラー	カナダ	5.6 kW	不明	1 回あたりの航続距離を 30～40%延長可能
SUNSWAP JS Davidson	トレーラー	イギリス	不明	不明	既存トレーラー（冷蔵）に導入可能。冷蔵配送時の影響なし
PXP 東プレ	トラック	日本	不明	不明	国内の物流車両に年間 452MW 導入された場合、年間で 408 kt の CO ₂ 削減が可能

(3) 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 を開発している。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²⁹、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³⁰。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開発している。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³¹。同国、TUX mobility は、太陽電池モジュールを搭載した小型の貨物輸送用の三輪 EV を開発しており、注目を集めている³²。同社は DHL や Amazon 等と連携して、開発を進めている。

日本国内でも小型車両への太陽電池搭載の動きが見られている。EV ジェネシス社はカルコパイライト型の太陽電池を搭載した 3 輪 EV「3 RUOTA (スリールオータ)」の実証実験を開始した³³。同モジュールの搭載により、1 日に 15~20km 走行分の電力充電が可能としている。搭載する太陽電池は PXP 製で電池は 1mm 厚程度で非常に軽量に抑えられている。また、PXP が開発中のペロブスカイトタンデム型の太陽電池にアップグレードした場合は、同じ面積で約 25~30km の走行が可能となる見込みである。

1.1.2 国内外における実用化・普及促進に向けた取組

(1) NEDO による研究開発事業の概略

NEDO では、「太陽光発電主力電源化推進技術開発」(2020~2024 年度)のもと、自動車等の移動体への搭載を意図した、あるいは応用が可能な低コストで高性能な太陽電池の実用化に向けた研究開発や、太陽光発電システム搭載自動車の発電量推定技術や想定市場への適合性および効果を最大化する市場導入モデルの検討手法の開発などを実施してきている(表 1.1-3)。

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。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((4)①参照)。

また、これらの研究開発に先立ち、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)との協力により、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 1.1-1~2)。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を実施しており、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いる。

本報告書の第 2 章では、一部ではあるが、これらの研究開発や実証走行、動向調査によってこれまでに得られている知見の概略を取り纏めている。

表 1.1-3 NEDO が実施している移動体用太陽電池、太陽光発電搭載自動車に関する研究開発 ³⁴

「移動体用太陽電池の研究開発／ 超高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 などのタンデム型太陽電池など）の高效率化技術、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。
「多接合型等を対象とした太陽電池の開発」	太陽電池の多様な可能性を追求し、更なる導入拡大を図るため、小面積でも高い変換効率となる多接合太陽電池や、透過率と変換効率のトレード・オフを想定した太陽電池の開発を行う。既存の市場に流通している太陽電池の技術制約の解消を目的として多接合型等高效率太陽電池のセル、ミニモジュールを開発する。
「新市場導入に向けた発電量予測技術の開発」	年間レベルでの発電量等の太陽光発電効果を推定する技術を確認し、想定する市場（移動体等）への適合性を判断できる技術を開発する。
「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。



図 1.1-1 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) ³⁵



図 1.1-2 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) ³⁶

(2) 日本における移動体向け太陽電池への取り組み

NEDO による技術開発事業を礎とし、自動車等の移動体への搭載を念頭に置いた太陽電池技術開発が日本企業により実施されている。

「移動体用太陽電池の研究開発／超高効率モジュール技術開発」では、シャープエネルギーソリューション㈱が中心となり³⁷、III-V 化合物による太陽電池技術開発を推進しており、上述の太陽光発電システム搭載自動車には当時の世界最高水準の高効率モジュール（31.17%）が搭載されている³⁶。2023 年 10 月には、化合物・シリコン積層型太陽電池モジュールで世界最高のエネルギー変換効率 33.66%を達成している³⁸。

「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」は㈱カネカが中心となり、ペロブスカイト／シリコンタンデム太陽電池の実用化技術を開発している³⁷。試作モジュールを用いた移動体への適用を想定した評価を実施し、その有効性を検証している。

「多接合型等を対象とした太陽電池の開発」では、㈱東芝が「Cu₂O タンデム型太陽電池の開発」を手掛けている³⁷。Cu₂O トップセルを高効率化し、タンデムセル変換効率 26%以上を目指している。

また、NEDO が推進しているグリーンイノベーション基金事業の支援を受け、ペロブスカイト太陽電池の開発・実用化を進める㈱エネコートテクノロジーズは、トヨタ自動車と共同で車載用ペロブスカイト太陽電池の開発を開始している³⁹。

これらの NEDO 事業の他、カルコパライト太陽電池の独自の製造技術を有する㈱PXP では、自動車等の移動体への適用が可能なフィルム型 CIGS 太陽電池を開発しており、乗用車屋根への搭載を試行しているほか、冷凍コンテナへの搭載に取り組んでいる⁴⁰。また、CIGS をボトムとしたペロブスカイトとのタンデム太陽電池の開発も手掛けており、2024 年 4 月には効率 26.5%の達成を報告している。

(3) 欧米における太陽光発電システム搭載自動車への取り組み

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が推進されている。

① 欧州

欧州では、EU の” Solar Energy Strategy”⁴¹において、自動車等移動体への太陽光発電搭載が今後の太陽光発電利用の拡大に向けた主要なアプリケーションの一つとして明確に記されており、太陽光発電研究開発の指針ともなる” Strategic Research and Innovation Agenda for Photovoltaics”⁴²にはコスト低減等の目標が示されている（表 1.1-4）

また、2023 年に欧州で開始された SolarMOVES プロジェクト⁴³では、様々なサイズの乗用車や商用車 23 種を対象とし、想定される代表的な走行パターンに応じたエネルギー消費量やそれらの車両に太陽光発電を搭載した場合の期待貢献度の推定を行っている⁴⁴。今後、幾つかの車両（車種）を選定し、太陽光発電を搭載した実証走行が実施される予定である。

表 1.1-4 欧州 : Strategic Research and Innovation Agenda for Photovoltaics に示された太陽光発電搭載自動車 (Vehicle Integrated PV) に関する KPI⁴²

KPI	Target value	Year
Standardization		
Performance Rating Methods	Methodology defined for accurate comparisons of systems in terms of additional power generation on a daily or monthly basis to help with customer understanding and comparisons. This must include differentiated use cases and understandable to customers.	2030
Homologation	Standards for Safety and Reliability to guide Road registration process in multiple countries.	2027
Vehicle Power Management	Shared and safe protocols defined for input to VPM for efficient charging while parked.	2030
Cost		
Manufacturing	Manufacturing concepts compatible with existing automotive supply chain requirements and processes including safety and traceability.	2028
System Additional Cost	Passenger Car: <800 EUR/m ²	2025
	Passenger Car: <500 EUR/m ²	2030
	Passenger Car: <250 EUR/m ²	2035
	Commercial Vehicles: <400 EUR/m ²	2028
	Commercial Vehicles: <200 EUR/m ²	2035
Technology		
BOS	Development of power conversion electronics suited for dynamic irradiance and vehicle integration, and gamification of technology use.	2030
Battery Impact	Theoretical and real world validation of impact on battery longevity, recyclability and temperature management.	2035
Circularity	Improved recyclability, repairability, reusability, and recoverability to exceed EU ELV requirements at component level.	2035
New Technologies	Investigation of integration of new PV technologies into vehicle environment (i.e. thin-film resistance to partial shading, Pb-free perovskite, (semi-)transparency, tandems, etc.)	2035
Data		
On-road	Demonstrate and validate on-road performance and reliability in various environments.	2028
Grid/Infrastructure	Large fleet modeling with grid integration and pilot studies.	2030

② 米国

米国では、太陽光発電システム搭載自動車への取り組みに先立ち、どのような可能性や期待、解決すべき課題があるかなど、広く意見を収集する RFI (Request for Information) が、エネルギー省 (DOE : Department of Energy) の Solar Energy Technology Office により、2022 年夏に実施された⁴⁵。そして、その結果を踏まえた総括として、トラック等商用車の屋根への設置 (VAPV)、乗用車や商用車屋根等への組み込み (VIPV) が期待され、短期的にはトラック等への VAPV が有望であるが、中長期的には VIPV への期待も大きく、自動車関連部局との連携を図り、可能性を追求、推進していくとの見解が示された^{46,47}。

その後、自動車への搭載も含めた、様々な太陽光発電アプリケーションに関する実証事業が立ち上がり (2023 年 7 月提案公募開始)、太陽光発電システム搭載自動車については、冷蔵トレーラーに太陽光発電搭載を実施するプロジェクトが採択された (2024 年 5 月公表)⁴⁸。軽量でフレキシブルな太陽電池モジュールを冷蔵トレーラー屋根に搭載し (VAPV)、太陽光発電による効果の検証、信頼性や環境耐性、保守管理などに関する実証が行われる^{48,49}。

(4) 太陽光発電システム搭載自動車に関する国際的な取り組み

前述のような技術開発や実証事業ではないが、太陽光発電システム搭載自動車の実用化、普及への貢献を目的とした国際的な取り組みも IEA（International Energy Agency）や IEC（International Electrotechnical Commission）の傘下で実施されている。

① IEA PVPS Task17

「IEA PVPS Task17 : PV and Transport」（IEA PVPS : International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme）は、運輸分野への太陽光発電の導入拡大により、中長期的な太陽光発電市場の拡大、ならびに運輸部門（特に自動車分野）における温室効果ガス排出量の削減に貢献することを目的とし、日本の提案により発足した IEA 傘下の国際協力プロジェクトである。

日本がフランスと共同で幹事国（議長）となり、太陽光発電システム搭載自動車や太陽光発電利用電気自動車充電ステーションに関する動向や実用化により期待される効果分析等を行っており、以下の Subtask から構成されている⁵⁰。

- Subtask 1: Benefits and requirements for PV-powered vehicles
- Subtask 2: PV-powered applications for electric systems and infrastructures
- Subtask 3: Potential contribution of PV in transport
- Subtask 4: Dissemination

Task17 への参加国は 2024 年末時点で 10 ヶ国、大学や研究機関、企業等からの専門家が集い、議論を行っている。これまでに作成した技術報告書は 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。

② IEC TC82 PT600

IEC TC82 は、太陽光発電システムおよび構成機器に関する国際規格を作成している。

車両（乗用車等）の屋根に搭載される太陽光発電は、曲面（3 次元）形状となることが多く、走行中に周辺環境により部分影などが生じるため、車載太陽電池の性能評価に必要な手法や条件が従来型（建物設置や地上設置など）の太陽光発電とは異なってくる。

そこで、車両搭載太陽電池向けのエネルギー定格に関する標準化を目指す国際協力プロジェクトとして、PT600 が設立された。このプロジェクトは日本がリーダーとなり、議論を牽引しており、以下の技術レポート（Technical Report）の作成を行っている⁵¹。

- EC TR 6XXXX: Monitoring three-dimensional solar irradiance around the automobile using array of pyranometers
- IEC TR 6XXXX: Modelling solar irradiance and its distribution and its distribution to VIPV affected by shading by buildings

1.2 太陽光発電システム搭載自動車による期待される効果

電気自動車（BEV）・プラグインハイブリッド自動車（PHEV）へ太陽光発電を搭載することにより、充電電力を系統電力から代替することによる系統電力の削減、充電頻度の低減、および CO₂ 排出量の削減が期待される。他方、太陽光発電の搭載により車重が増加するため、車両の電力消費量に影響してしまう点を考慮する必要がある。加えて、太陽光発電搭載による効果は走行パターンだけではなく、搭載する太陽光発電の容量や蓄電池容量によっても変化する。

ここでは、太陽光発電システム搭載自動車 1 台あたりの効果を試算するとともに、将来的に太陽光搭載自動車が普及した場合のシナリオ分析を行った。

1.2.1 前提条件等

電気自動車等の諸元については基本的に過年度までの値を踏襲し、ベース車両としては BEV の場合に 40 kWh の蓄電池、PHEV の場合に 15 kWh の蓄電池を搭載しているものを想定し、搭載する太陽光発電容量は昨年度と同様、200 W から 1,000 W（1 kW）とした。また、蓄電池の製造原単位は ICCT にて公開されている日本の NMC の値を採用し⁵²、車重増減による電費・燃費への影響は、省エネ法トップランナー制度⁵³にて提示されている車重と燃費の関係式を採用した（ただし、トップランナー制度で提示されているのは「車重と燃費」の関係式なので、「車重と電費」の関係性を考慮するにあたっては、車重増加に伴う燃費の変化率を算出し、車重と電費の関係性として適用した）。走行パターンは昨年度までと同様に 6 パターン（休日利用：A-1（週 2 日：150 km/日、年間走行距離：15,600 km/年）および A-2（週 2 日：50 km/日、年間走行距離：5,200 km/年）、平日休日利用：B-1（週 4 日：50 km/日、年間走行距離：10,450 km/年）および B-2（週 4 日：5 km/日、年間走行距離：1,045 km/年）、平日利用：C-1（週 5 日：50 km/日、年間走行距離：13,050 km/年）および C-2（週 5 日：15 km/日、年間走行距離：3,915 km/年））を想定した。なお、車両に対して太陽光発電を搭載することを考える場合、太陽光パネルの搭載に伴って前面投影面積が増加し、空気抵抗が増加（電費・燃費が悪化）することも懸念されるが、市街地走行の多い国内では相対的に空気抵抗の影響は小さくなるため、ここでは車重の影響のみを考慮することとした。その他、系統充電に係る運用の想定として、BEV の場合は太陽光発電を搭載するメリットが大きい運用とすべく、「走行中に残存電力量が足りなくなれば系統から充電する」とし、PHEV の場合は PHEV であることのメリット（電気走行を主としつつも、蓄電池の電力量が足りない場合にはガソリン走行に切り替わる）が大きい運用とすべく「次の日の予定走行距離に照らして蓄電池の残存電力量が足りない場合に自宅にて系統電力から充電し、走行中に残存電力量が足りなくなればガソリン走行に切り替わる」こととした。その他、将来的に太陽光発電搭載自動車が普及していく社会を見据え、系統電力の排出原単位、太陽光発電および蓄電池製造時の CO₂ 排出量、および太陽電池モジュール重量が経年で変化していく場合の試算も行った。

1.2.2 太陽光発電システム搭載自動車に期待される効果（車両 1 台あたり）

(1) 系統からの充電電力の削減効果（省電力）

太陽光発電システム搭載による系統からの充電電力の削減効果を図 1.2-1～2 に示す。BEV の場合、太陽光パネルを搭載することにより電費が悪化するものの、いずれのケースでも系統電力を削減できている。他方、PHEV の場合、A-1 や B-2 の場合でその効果は小さい。これは、太陽光発電の利用率が小さいことに起因しており、A-1 の場合は 1 走行あたりの走行距離が大きいため前

日の系統充電が必須となり、結果的に太陽光発電の恩恵を受けにくく、太陽光発電を搭載する効果が電費・燃費悪化と相殺されてしまっている。B-2 の場合は逆に 1 走行あたりの走行距離が小さいため、発電された太陽光発電の電力量の多くが捨てられてしまっている。それ以外のケースでは、PHEV の場合も系統電力の削減に寄与することが示されている。

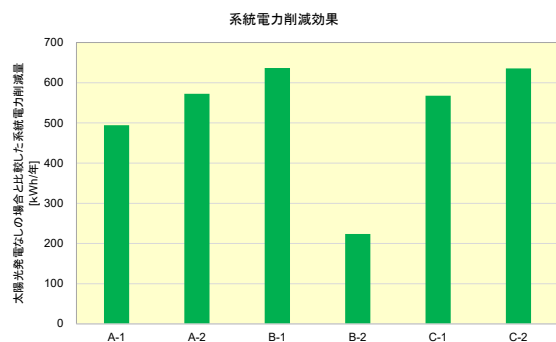


図 1.2-1 太陽光発電システム搭載自動車 (BEV) 1 台あたりの系統電力削減効果 (BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

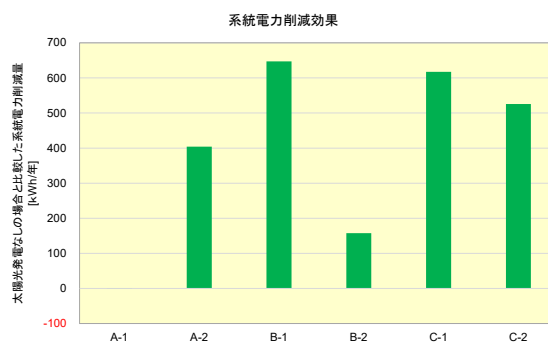


図 1.2-2 太陽光発電システム搭載自動車 (PHEV) 1 台あたりの系統電力削減効果 (PHEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 15kWh)

(2) 充電頻度削減効果

太陽光発電システム搭載による系統からの充電回数の削減効果を図 1.2-3～4 に示す。BEV の場合、いずれのケースでも充電頻度を減らすことに繋がっている。特に B-2 の場合、太陽光発電による電力量だけで賄える形 (充電回数ゼロ回) になっている。他方、PHEV の場合、A-1 では充電回数が増えてしまっている。A-1 は 1 走行あたりの走行距離が大きいいため、走行日は充電電力量を使い切ってしまう形となる。他方、太陽光パネルの ECU 消費電力を賄うため、走行日の次の日に系統充電からの充電が必須となり、結果的に系統電力からの充電回数が増えてしまっている。それ以外のケースでは、PHEV の場合も充電回数の削減に大きく寄与することが示されている。

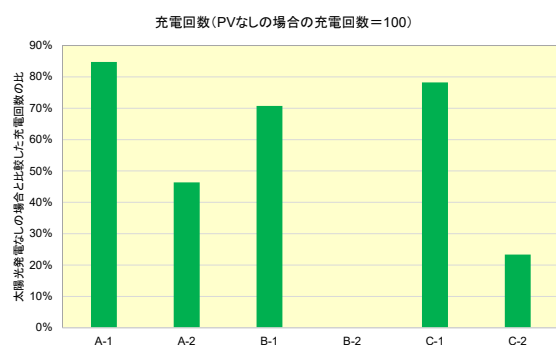


図 1.2-3 太陽光発電システム搭載 (BEV) による充電頻度削減効果 (BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

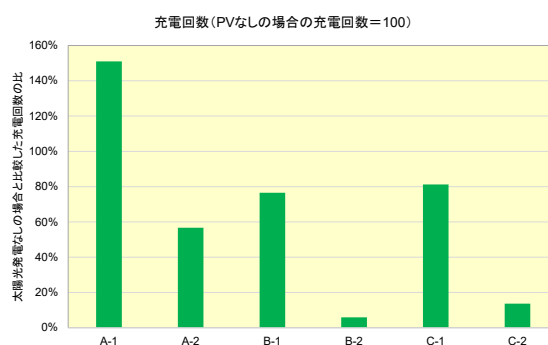


図 1.2-4 太陽光発電システム搭載 (PHEV) による充電頻度削減効果 (PHEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 15kWh)

(3) CO₂ 排出削減効果

太陽光発電システム搭載自動車 1 台あたりの CO₂ 排出削減効果を図 1.2-5～6 に示す。いずれのケースも CO₂ 排出削減効果を発揮できており、A-1 を除いて BEV の場合も PHEV の場合もその効果は概ね同程度である。これは、A-2～C-2 において、いずれも太陽光発電電力の利用率が概ね同程度になっていることに起因している（走行距離が短い B-2 を除いて、いずれのケースも太陽光発電電力の利用率は高い）。他方で A-1 は BEV と PHEV で大きく異なる結果となっているが、上記までの理由と同様に、1 走行距離が大きいことに起因している。PHEV で A-1 パターンを走行する場合、そのほとんどがガソリン走行となってしまうため、車重の増加による燃費の悪化の影響が大きく表れている結果となっている。

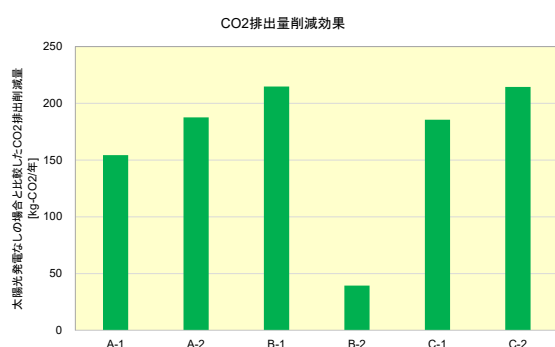


図 1.2-5 太陽光発電システム搭載自動車 (BEV) 1 台あたりの CO₂ 排出削減効果 (BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

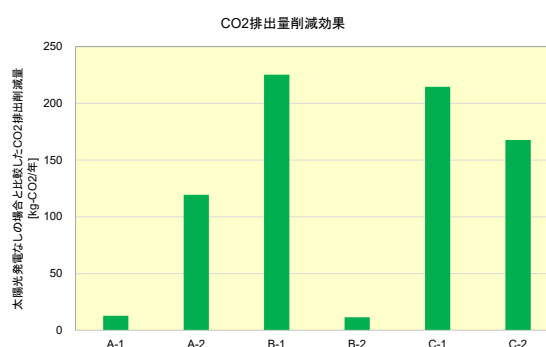


図 1.2-6 太陽光発電システム搭載自動車 (PHEV) 1 台あたりの CO₂ 排出削減効果 (PHEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 15kWh)

(4) 電費による効果変動の試算

上記の試算においては、既存の BEV や PHEV に太陽光発電システムを搭載することを前提としている。他方、太陽光発電システム搭載自動車の普及が進むには時間がかかると想定されるなか、普及が進む時点では BEV や PHEV の電費・燃費が現状よりも改善している可能性が高い。そこで、ベース車両の電費・燃費が改善した場合の太陽光発電システムを搭載する効果を試算することとした。BEV については、省エネトップランナー制度にて想定されている現在の BEV の基準値と 2030 年以降に想定されている BEV の基準値の比を取り、その値を既存のベース車両の電費に乗じることで改善後の電費の値として採用した。PHEV については、電費は BEV と同様の考え方を採用し、燃費は約 1,400 kg の自動車（ベース車両の車重から、想定される蓄電池重量を減算）が省エネトップランナー制度にて求められる燃費の改善率を採用し、既存のベース車両の燃費に乗じることで改善後の燃費の値として採用した。

BEV におけるそれぞれの効果は図 1.2-7～9 に示すとおりであり、走行距離が比較的大きいパターンにおいて系統電力削減効果や CO₂ 排出削減効果が大きくなり、短いパターンでは逆の結果となっている。1.2.3 に示すシナリオ分析では、PHEV についても同様の試算を行ったうえで、改善後の電費・燃費による試算結果を用いている。

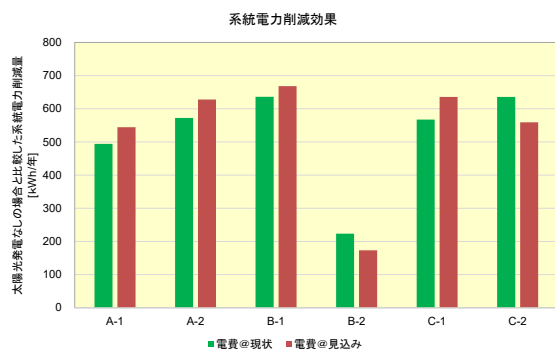


図 1.2-7 電費の違いによる系統電力削減効果
(BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

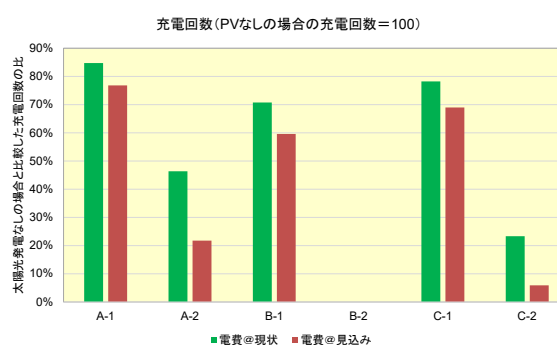


図 1.2-8 電費の違いによる充電頻度削減効果
(BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

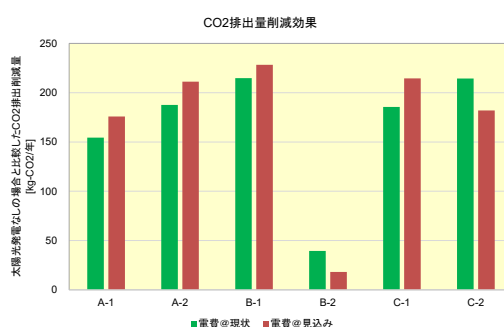


図 1.2-9 電費の違いによる CO₂ 排出削減効果
(BEV, 太陽光発電容量 1kW, 蓄電池容量 40kWh)

1.2.3 太陽光発電システム搭載自動車の普及による効果（シナリオ分析）

将来の太陽光発電システム搭載自動車の普及見通しを想定し、日本国内における太陽光発電システム搭載自動車の普及による効果に関するシナリオ分析を行った。

富士経済「2023 年度版 HEV、EV 関連市場徹底分析調査」⁵⁴における 2030～2035 年の販売台数見通しの傾向を維持するものと想定し、国内の EV および PHEV の販売台数の見通しを算出した。ただし、2035 年までに新車販売に占める電動車比率を 100%とする目標を踏まえ、2035 年までに内燃車販売見通しのうち一部が電動車へ置き換わるものとした補正を行った。直近動向から自動車の使用年数は 13 年と想定し、前述の販売台数見通しから普及台数見通しを算出した。

電動車に占める太陽光発電搭載自動車の比率を 3 パターン（早期普及：2050 年に搭載率 100%、普及中位：2060 年に搭載率 100%、普及低位：2070 年に搭載率 100%）設定することで、日本における太陽光発電搭載自動車の普及見通しを作成した。

1 台あたりに搭載される太陽光発電パネルの容量は、2025 年に販売される自動車に対しては直近の商用化事例を踏まえて 200W とし、搭載容量 1,000W を上限として搭載容量の増加ペースを変動させた 2 パターン（搭載容量高位：毎年 40W 増加、搭載容量低位：毎年 20W 増加）での分析を行った。また、系統電力の CO₂ 排出量は、World Energy Outlook 2023 (WEO2023)⁵⁵の現行政策シナリオ (Stated Policies Scenario : STEPS) の系統電力の CO₂ 排出原単位の想定値を使用した。太陽光発電システム搭載自動車 1 台あたりで期待される効果は前述の分析結果を使用した。走行パターンにより CO₂ 排出削減効果が負となる場合があるが、自動車販売時に CO₂ 排出削減効果が

正となる場合のみに太陽光発電が搭載されるものと想定した。1 台あたりの分析では 6 種類の走行パターンでの分析を行っており、日本国内の自動車台数を前述の 6 種の走行パターンへの按分を行った。按分には、Kimura らの研究^{56,57)}における日本国内 5,000 台の走行パターンの調査結果を使用した。

これらの想定から、日本における太陽光発電搭載自動車の普及による CO₂ 排出削減効果および系統電力消費削減効果を図 1.2-8～9 に示す。2050 年の BEV および PHEV の普及台数は、ケースによって BEV1,600～2,800 万台、PHEV170～360 万台となり、CO₂ 排出削減効果は、早期普及×搭載容量高位ケースでは 2040 年代に 50 万 tCO₂ を上回る見通しとなった。以降、A-1 および B-2 パターンで、系統電力の CO₂ 排出係数の減少に伴って CO₂ 削減効果が負となることから、国内における PV 搭載自動車による CO₂ 排出削減効果は減少するものの、早期普及×搭載容量高位ケースにおける 2050 年度の CO₂ 排出削減効果は約 35 万 tCO₂ となる。World Energy Outlook 2023 (WEO2023) の発表制約シナリオ (Announced Pledges Scenario : APS) では、2050 年の日本の輸送部門での CO₂ 排出量は 1,900 万 tCO₂ とされており、太陽光発電搭載自動車の導入により、内燃車から電動車への移行がなされてからさらに約 2%の追加的な排出量削減に繋がる可能性がある。

前述のとおり、CO₂ 排出削減効果は系統電力の CO₂ 排出係数の減少に伴って 2040 年半ばから減少するものの、系統電力削減効果は全てのケースで 2050 年度にかけて増加傾向となり、2050 年に 6,300～17,000 GWh となる見通し。WEO2023 の APS における 2050 年の輸送部門の電力消費量見通しは 593 PJ (164,722 GWh) であり、前述の系統電力削減効果の試算結果はこの 3.8～10.3%に相当する。また、自動車への太陽光発電の搭載により電気自動車の充電回数の削減が期待されるが、前述の想定に基づくと、導入当初は太陽光発電の搭載に伴う重量増加により充電回数が増加するものの、2050 年には、2 億～5.4 億回の充電回数削減が期待される。充電回数の削減により、電気自動車の普及により必要となる充電インフラ等の社会コストの削減にも繋がると考えられる。

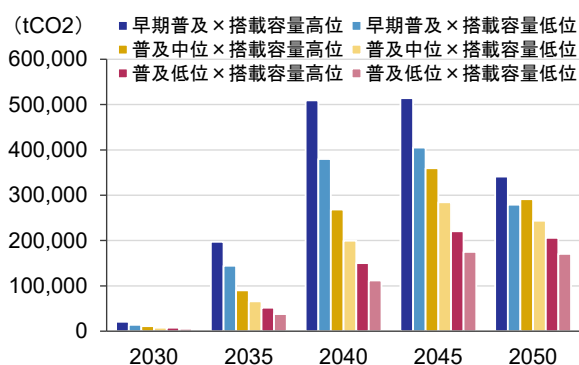


図 1.2-8 日本における太陽光発電システム搭載自動車による CO₂ 排出削減効果の見通し

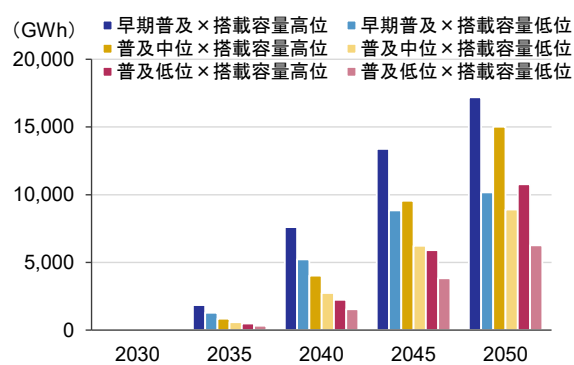


図 1.2-9 日本における太陽光発電システム搭載自動車による系統電力消費削減効果の見通し

し

【第 1 章 参考文献】

- ¹ 一般社団法人日本自動車工業会ホームページ：「世界生産・販売・保有・普及率・輸出」（2025 年 1 月 10 日確認）
- ² IEA：Tracking Transport 2020（2020）（<https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>）
- ³ IEA：Global EV Outlook 2024（2024）（<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>）
- ⁴ 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/100961854.pdf>）
- ⁵ 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>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ⁶ 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>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ⁷ レスポンス社「【トヨタ プリウス PHV 新型】ソーラー充電システムは 28 万円で普及グレードに設定」（2017/2/15 記事）（2025 年 3 月 10 日確認）
- ⁸ トヨタ自動車株式会社：Web カタログ
（https://toyota.jp/pages/contents/request/webcatalog/prius/prius_main_202502.pdf）（2025 年 3 月 10 日確認）
- ⁹ Karma Automotive「Revero」ホームページ
（<https://karmaautomotive.com/revero/>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁰ 公益社団法人 自動車技術会 Web ページ
（<https://guide.jsae.or.jp/topics/252994/>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹¹ 米国現代自動車ホームページ
（<https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/sonata-hybrid/compare-specs>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹² 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_202410.pdf）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹³ トヨタ自動車株式会社「TOYOTA Technical Review vol.68」（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁴ 英国現代自動車ホームページ
（<https://www.hyundai.com/uk/ioniq-5/ioniq5/specifications.html#>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁵ Tesla「Cybertruck」ホームページ（https://www.tesla.com/ja_jp/cybertruck）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁶ Mercedes-Benz「Vision EQXX」ホームページ
（https://media.mercedes-benz.com/vision_eqxx）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁷ トヨタ自動車株式会社「TOYOTA Technical Review vol.69」（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁸ Lightyear 社,「Lightyear 0」ホームページ（<https://lightyear.one/lightyear-0>）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ¹⁹ Sono motors 社,「Sion」インフォメーションシート
（https://sonomotors.com/site/assets/files/1621/sonomotors_informationssheet_sion_1.pdf）（2025 年 1 月 10 日確認）
- ²⁰ IM Efficiency ホームページ（<https://imefficiency.com/>）（2022 年 10 月 4 日確認）

- 21 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」
(<https://www.mizuho-ls.co.jp/ja/news/news2021020501/main/0/link/Delivery%20of%20Zero-Emission%20Refrigerated%20Trailers%20for%20Leasing%20by%20PLM%20Fleet,%20LLC..pdf>) (2021 年 2 月 5 日公開) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 22 Trailer ウェブページ (<https://www.trailar.co.uk/products>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 23 MiaSolé 社プレスリリース (<https://miasole.com/miasole-hanergy-and-trailer-deutsche-post-dhl-unveil-solutions-to-global-logistic-green-energy-power-showcase/>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 24 ナガサキロジスティクス(株)ウェブページ (<https://nagalogi.co.jp/info/5919246>) (2024 年 9 月 19 日)
(2025 年 1 月 10 日確認)
- 25 メガソーラービジネス「大型冷凍車に太陽光パネル搭載、5%の燃費改善効果」(2025 年 1 月 10 日確認)
- 26 PLM fleet ウェブページ
(<https://www.plmfleet.com/fleet-solutions/zero-emissions->) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 27 Fraunhofer ISE : Lade-PV – Development of Vehicle-Integrated Photovoltaics for On-Board Charging of Electric Utility Vehicles
(<https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/lade-pv.html>) (2025 年 1 月 10 日)
- 28 STROM-FORSCHUNG : E-truck runs on solar energy from its own vehicle roof (2021 年 11 月 11 日公開) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 29 Aptera Motors ウェブページ (<https://www.aptera.us/about>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 30 Aptera Motors ウェブページ (<https://www.aptera.us/faq>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 31 Squadmobility ウェブページ
(<https://squadmobility.com/>, <https://www.squadmobility.com/#specs>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 32 TUX mobility ウェブページ (<https://www.tuxmobility.com/>) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 33 スマートモビリティ JP : 「ソーラーパネル搭載の画期的な三輪 EV 「3 RUOTA」 が登場。オーダーメイドにも対応」、(https://smart-mobility.jp/_ct/17701259) (2025 年 1 月 10 日確認)
- 34 NEDO : 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」 基本計画 (2024 年 7 月改訂)
(<https://www.nedo.go.jp/content/100930776.pdf>) (2025 年 1 月 8 日確認)
- 35 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) (2025 年 1 月 8 日確認)
- 36 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) (2025 年 1 月 8 日確認)
- 37 NEDO : 「太陽光発電主力電源化推進技術開発 2024 年度実施方針」
(<https://www.nedo.go.jp/content/100972461.pdf>) (2025 年 1 月 8 日確認)
- 38 NEDO : ニュースリリース「化合物・シリコン積層型太陽電池モジュールで世界最高のエネルギー変換効率 33.66%を達成 -太陽電池を搭載した電動車開発に貢献-」(2023 年 10 月 23 日)
(https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101700.html) (2025 年 1 月 8 日確認)
- 39 (株)エネコトテクノロジーズ：ニュースリリース「車載用ペロブスカイト太陽電池の共同開発をトヨタと開始～発電効率がよく、走行時の CO2 排出量低減が期待できる次世代太陽電池～」(2023 年 6

月 27 日)

⁴⁰ (株)PXP website (<https://pxpco.jp/>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴¹ EU: Solar Energy Strategy, 2022 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A221%3AFIN&qid=1653034500503>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴² ETIP/EERA: Strategic Research and Innovation Agenda for Photovoltaics, Aug. 2024 update (https://media.etip-pv.eu/filer_public/f5/8b/f58b06d7-60fa-457a-8562-80eb71fa667c/etip_pv_-_sria_report_update-_august24.pdf) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴³ SolarMoves brochure (<https://publications.tno.nl/publication/34642389/SKwCWv/tno-2024-solarmoves.pdf>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴⁴ A. J. Carr : Modelling the impact of VIPV, Conference & Exhibition on Vehicle Integrated PV (PV in Motion 2024) , Neuchatel, Switzerland, March 2024

⁴⁵ U.S.DOE, SETO : Challenges and Opportunities for Vehicle Photovoltaics, July 2022

⁴⁶ U.S.DOE, SETO : Summary: Vehicle-Integrated Photovoltaics Request for Information (<https://www.energy.gov/eere/solar/summary-vehicle-integrated-photovoltaics-request-information>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴⁷ J. DiStefano, et al. : Challenges and Opportunities for VIPV: The Perspective of the U.S. Department of Energy, Conference and Exhibition on Solutions for Vehicle Integration (PV in Motion 2023) , s-Hertogenbosch, the Netherlands, February 2023

⁴⁸ U.S.DOE, SETO : Silicon Solar Manufacturing and Dual-use Photovoltaics Incubator Funding Program (<https://www.energy.gov/eere/solar/silicon-solar-manufacturing-and-dual-use-photovoltaics-incubator-funding-program>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁴⁹ Wabash National Corporation : News “Wabash Partners with University of Delaware to Advance Solar Solutions in Commercial Transportation” (2024 年 10 月 10 日) (<https://ir.onewabash.com/news/news-details/2024/Wabash-Partners-with-University-of-Delaware-to-Advance-Solar-Solutionsin-Commercial-Transportation/default.aspx>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁵⁰ IEA PVPS Task17 ウェブサイト (IEA PVPS ウェブサイト内) (<https://iea-pvps.org/research-tasks/pv-for-transport/>) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁵¹ IEC TC82 ウェブサイト (https://www.iec.ch/ords/f?p=103:14:527618088944:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:27684,25#) (2025 年 1 月 9 日確認)

⁵² ICCT : WHITE PAPER A GLOBAL COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC PASSENGER CARS

⁵³ 資源エネルギー庁：機器・建材トッランナー制度について

⁵⁴ 富士経済：2023 年度版 HEV、EV 関連市場徹底分析調査

⁵⁵ IEA : World Energy Outlook 2023 (2023)

⁵⁶ Kazutaka Kimura ら : Techno-Economic Analysis of Solar Hybrid Vehicles Part 1:Analysis of Solar Hybrid Vehicle Potential Considering Wellto-Wheel GHG Emissions (2016)

⁵⁷ Kazutaka Kimura ら : Techno-Economic Analysis of Solar Hybrid Vehicles Part 2 Comparative Analysis of Economic, Environmental, and Usability Benefits (2016)

第2章 太陽光発電システム搭載自動車の実証走行等から得られた知見

運輸部門からの CO₂ 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¹、CO₂ 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。

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発展途上の状況であるが、NEDO では、自動車メーカーとの協力により、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）する乗用車を開発し、公道における実証走行を実施している。

太陽光発電システム搭載自動車の市場化は、乗用車よりも商用車の方が早いとみる向きもある。国内外で様々な取り組みが行われ始めており、NEDO においても、効果的な市場投入方法の検討手法を開発する実証プロジェクトを実施している。

また、自動車への太陽光発電システムの搭載は、建物や地上への設置とは異なる条件での使用となることから、信頼性評価やレジリエンスなど、太陽光発電システム搭載自動車の市場化・普及促進を支えるための取り組みも並行して行われている。

ここでは、太陽光発電システム搭載自動車の実証走行をはじめとする NEDO が推進しているプロジェクトについて、これまでに得られた主要な知見を概説する。

表 本章にて取り上げる太陽光発電システム搭載自動車関連プロジェクトと主なポイント

乗用車への太陽光発電搭載	プラグインハイブリッド自動車	発電電力量と走行可能距離、曲面を有する車載面の日射量・発電量の評価
	電気自動車	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
商用車への太陽光発電搭載	電動商用車	太陽光発電搭載による効果の定量評価技術の開発
	内燃機関走行トラック・トレーラー	太陽光発電搭載による実証走行と設計技術の開発
乗用車搭載用太陽電池モジュールの信頼性評価		信頼性評価項目の調査・検討と信頼性試験の実施
車載太陽電池によるレジリエンス効果		災害等による非常時における独立電源としての効果

2.1 乗用車への太陽光発電搭載

乗用車への太陽光発電搭載は欧州のスタートアップ企業が実用化に向けた開発の先陣を切っていたが、日本においても 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、世界に先駆けて、太陽光発電システム搭載自動車の公道における実証走行を開始した。

この事業の目的は、公道における実証走行を通じて、高効率太陽電池を自動車に搭載することによる電動車両の航続距離や燃費向上効果を検証するとともに、太陽電池モジュールの発電量や駆動用バッテリーへの充電量などのデータを検証し、今後の車載用太陽光発電システムの開発の推進に活用することである。

ベースとした車両（乗用車）はプラグインハイブリッド自動車と電気自動車で、世界最高水準の高効率太陽電池セル（変換効率 34%以上）を用い、1kW 級の定格発電電力を有する太陽電池モジュールを搭載している。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。

表 2.1-1 太陽光発電システム搭載乗用車の実証車両

ベース車両	プラグインハイブリッド自動車 プリウス（トヨタ自動車）	電気自動車 eNV200（日産自動車）
太陽電池定格出力	860 W	1,150 W
太陽電池セル	III-V族化合物太陽電池（シャープ）、発電効率：>34%	
蓄電池容量	8.8 kWh	40 kWh

2.1.1 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：発電電力量と走行可能距離、曲面を有する車載面の日射量・発電量の評価

(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、公道走行実証を実施している。

プリウス PHEV には結晶 Si 太陽電池モジュール 1 枚ほどを搭載した車両を市販しているが、実証車両では大幅に発電電力を向上させたことに加え、市販車両では駐車中のみ行っている駆動用バッテリーへの充電を、実証車では走行中にも行えるシステムを採用し、車両航続距離や燃費の大幅向上を見込んでいる。

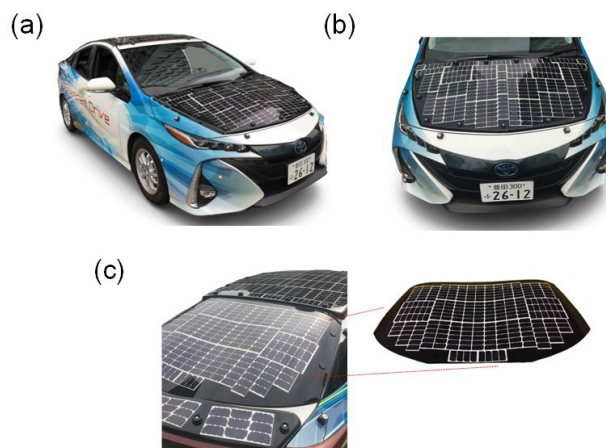


図 2.1-1 太陽光発電を搭載した PHEV 実証車

表 2.1-2 実証車両と従来型製品との比較

性能項目 \ 車両	「プリウス PHV」 (ソーラー充電システム装着車)	実証車
太陽電池セルの変換効率	22.5%	34%以上
定格発電電力	180 W	約 860 W
く同時の駆動用バッテリーへの最大充電電力量 (日当たり)	EV 航続距離 6.1 km 相当	EV 航続距離 44.5 km 相当
走行時の駆動用・補機バッテリー系統への最大充電・給電電力量 (日当たり)	カーナビなどに使用する補機バッテリー系統にのみ電力を供給	EV 航続距離 56.3 km 相当

(2) 発電電力量と走行可能距離

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 2.1-3 に示す走行パターンに沿った条件で、愛知県内において、実証走行試験を行った。

表 2.1-3 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	
B	近郊街乗り (買物、送迎等)	5	
C	通勤 (郊外)	15	
D	市街地	15	

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、午前と午後にそれぞれ 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 2.1-2 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。

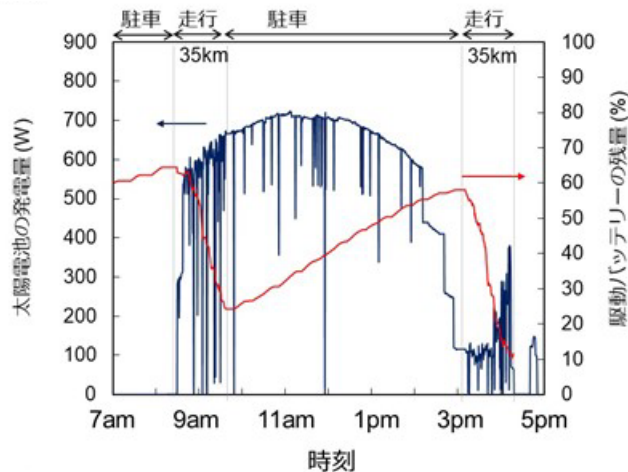


図 2.1-2 実証車に搭載した太陽電池の発電量と駆動バッテリー残量の推移

図 2.1-3 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/m²)) と見積もられた。例えば、東京の年間日射量は約 1,200 kWh/m²/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が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、CO₂ 排出量が 62%削減することが可能という結果が得られた²。

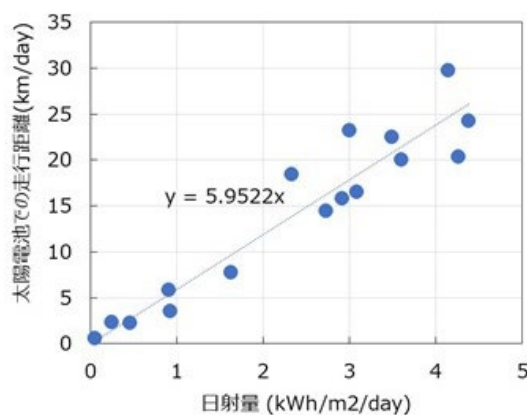


図 2.1-3 太陽エネルギーによる走行距離と日射量の関係

(3) 車載曲面における日射量・発電量の解析

① 発電量予測へのアプローチ

発電量を予測するためには、日射データ収集のための計測が必要となるが、車載面は道路周辺の構造物の影の影響を受けやすい上、受光面の向きもさまざまに変化する³。そのため、海外の研究機関を含め、車載面の日射についてはさまざまな検討がなされてきた。大きく分類すると、単一の日射計による計測、複数の日射計による計測に分類される(表 2.1-4)。それぞれに得失があり、目的に応じて使い分けなければならない。日射量を算定する目的では、複数日射計によ

る計測結果をベースとして、車載面特有のさまざまな擾乱（部分日影など）を確率的にモデル化してその期待値として日射量を算出する必要がある。

表 2.1-4 日射計種別による計測方法分類

	単一日射計による計測 ^{4,5,6}	複数日射計による同時計測 ^{7,8}
計測・評価方法	セル・モジュール平面への日射量計測 →発電素子効率、パフォーマンス評価	3D 日射計測→曲面、不均一日影、部分日影など総合的な日射評価
従来法との比較	従来の PV 評価方法をそのまま適用	車載向け日射として開発され、その後、優秀さが認められて日、独、仏、西などさまざまな研究機関で採用
計測等の実施例	産総研商用車実証(NEDO) ⁹	宮大他欧州研究機関（直交 5 軸） ^{10,11} トヨタ自動車 NEDO 実証車（斜交 10 軸）
特徴・留意事項	モデル検証容易、反面、間違ったモデルでも特定の経路や季節で計測結果と一致する危険あり	モデルが不完全だと冗長計測で誤差が拡大するため、モデル不完全性の検出が可能、これを利用して要因解析に活用可能
	走行実験を通じて車載 PV（セル・モジュール）の発電性能や癖について学ぶのに便利である反面、ミスリーディングや Unconscious bias にとられやすい。	さまざまな日射・走行環境で車載 PV がどのような挙動を示すかが判明し、設計に適用できる。

また、日射データ収集に関しても、特定のルートで計測するか、ランダムなルートで計測するか、十分に考慮して使い分ける必要がある。さらに、一般的な発電量指標を提示するには、日射観測結果を科学的に外挿する必要があるため、何等かのモデル化が必要である。走行実験での日射量測定結果の集計では特定ルートの特定日時の結果しか得られないが（表 2.1-5）、特定走行ルートによる計測は複雑な事象の理解には有効であり、曲面（自己影、ミスマッチング損失）や部分日影の影響を強く受ける乗用車向け車載太陽電池の解析には有用である。

表 2.1-5 走行ルート別による計測・シミュレーション方法分類

	特定ルート	ランダムルート	確率モデル
計測方法	特定のルートで何度も走行 （異なる季節や天候で）	協力ユーザーを募り、自由に走行してもらい、データを遠隔収集	遮蔽確率など日影環境を確率モデル化して解析する
計測等の実施例	NEDO 乗用車実証 NEDO 商用車実証（産総研）	Fraunhofer 研、リスボン大 NEDO 商用車実証（宮大等）	宮大、リスボン大 IEC 国際規格（審議中）
特徴・留意事項	Unconscious bias やミスリーディングにとられやすい（季節、時刻、天候の偏りによりさらに bias）。	公正な発電量データが得られるが、リスボン市など特定地域のデータとなる。	各地に適用できる発電量指標が得られるが、モデル自体の吟味と検証が必要である。
	パワーモデル開発に有効だがエネルギーレーティングには不向き。	発電性能に及ぼす影響の抽出が困難。	エネルギーレーティングには有効だが、パワーモデルには不適。

乗用車では、3次元曲面車体に実装が必要で、複雑な挙動を示すことから、乗用車向け車載太陽電池の評価に対しては、技術者による複数日射計の同時計測を特定経路にて繰り返し、高度な解析を行うことにより、複雑な現象の定量的理解を行うとともに、設計に有用な指針を導き出すことを目指した(表 2.1-6)。

表 2.1-6 乗用車における発電量予測へのアプローチ

- ・複数同時日射計測、斜交 10 軸
- ・特定ルート
- ・曲面太陽電池
- ・自己影あり
- ・部分日影の影響大
- ・多接合太陽電池
- ・自社技術者による計測
- ・走行中の日影による発電量変動に加え、車高の低い曲面車体に伴う部分日影や曲面損失、スペクトル変動により発電量変動
- ・微分幾何学、部分日影確率など車体曲面に伴う高度な数理モデルの研究開発
→ 太陽電池搭載乗用車の設計技術開発

② 走行経路

日射量・発電量の解析に用いたデータの元となる走行経路を図 2.1-4 に示す。データ取得のための走行は静岡県内で実施した。

特に指定の無い限り、それぞれの走行方位は一定と見なして解析した。ただし、この仮定は必ずしも必要なく、GPS や電子コンパスなどから車体の相対方位は把握できるため、局所座標系を用いて解析することで、任意の車体方位で、発電量を算出することができる。



図 2.1-4 日射量・発電量の解析に用いたデータの元となる実証車の走行経路（静岡県内）

③ 車載曲面における日射量・発電量の補正係数

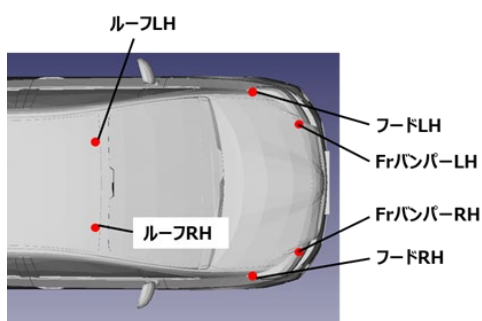
乗用車の場合は車体が 3 次元曲面であり、車体そのものの自己影、近接した周辺構造物（ガードレールなど）による部分日影の影響を受けるため、単純に日影確率から算出した日射量で発電

量を予測することはできない。

図 2.1-5 は南側が海岸となる日射条件が良好なルートでの走行の計測結果であるが、車体曲面各部での日射量は理論値 1 を下回る。しかしながら、屋根面に限定すると、部分日影による損失も年間・時刻を一様にして観測する限り、その影響は、曲面部分日影損失と比較して、左側側面を除けばそれほど顕著ではなく、曲面太陽電池の微分幾何学的アプローチにより算出および検証が可能である。

例外はエンジンフード左側（フード LH の位置）での日射量である。ここは左側面に近く、取り付け高さも低いことから、ガードレースや植栽などによる不規則な日影の影響を受けやすい。今回の解析ではこれらのイレギュラーな日影は考慮しなかったため、計算値が過大となっているが、このような日影環境は地図などから情報収集することはできないため、確率モデルからの期待値として算入する必要があるであろう。

＜日射計取り付け位置＞



＜車体曲面各部での日射量（計算と計測との比較）＞

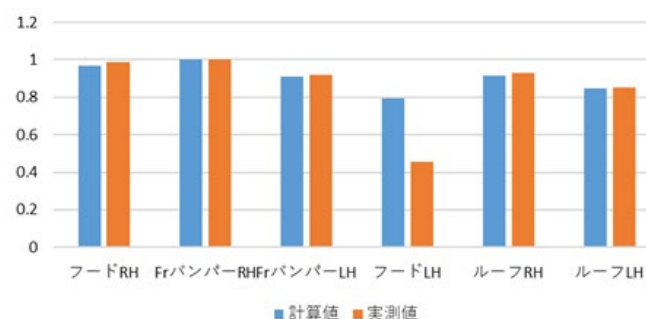


図 2.1-5 乗用車車体曲面各部での日射量計算値と計測値との比較

この車体曲面由来の日射量揺らぎの度合いは、天候や太陽高度によって大きく変動する。日射量の時系列変動の一例を図 2.1-6 に示す。

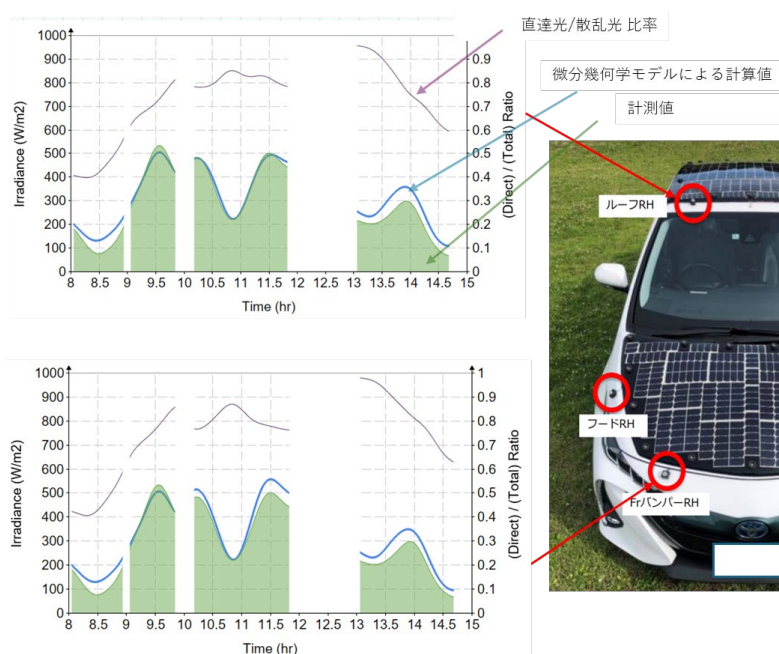


図 2.1-6 車体曲面各部での日射強度変動の予測値と計測値との比較

なお、本解析においては複雑にカーブした市街地の走行も含むため、図 2.1-4 に示した区間毎に車体方位が一定とすることは困難である。また、長時間の走行での解析となるため、天候状態（特に直達日射強度と散乱日射強度との比率）を一定と見なすことも無理である。そこで、多変量解析の技法を用いて、斜交 10 軸の日射計で計測された日射強度バランスから、モデルとの誤差の自乗が最小になるように、時々刻々の車体方位と天空での直達および散乱日射量（各々周辺構造物による日影および天空遮蔽による時々刻々の変動の影響を受けるものとする）を算定し、これに対し、微分幾何学的アプローチによる車体曲面各部の日射高度を算出するといった流れで算定した。ただし、前述のガードレールや植栽などによる近接構造物の影響は算入していない。

これらの損失量は車体の曲面形状により大きく変動する。したがって、太陽電池搭載車は曲面での発電挙動に対し細心の注意を払って設計する必要がある。しかしながら、この曲面由来損失は微分幾何学的アプローチにより計算可能であり、その計算手法については検証されたため、設計に適用することが可能である。

曲面車体を覆う太陽電池の発電出力は、日射量分布よりもはるかに複雑であり、車体方位や太陽高度により大きく変動する。これについても、微分幾何学を用いた解析で発電量を予測することが可能であるが、特に、エンジンフードやリア部の太陽電池は部分日影の影響も強く受けるので、計算値よりも実測値が低く計測される傾向にある。

曲面の影響は複雑であり、曲面形状や太陽方位、太陽高度、走行方位、部分日影などの影響を強く受けるため一概に言えないが、補正係数としては表 2.1-7～8 のように算定される。なお、表の計算は曲面全体ではなく、太陽電池が被覆している領域での計算結果である。また、発電量の曲面補正係数は、曲面の形状だけでなく、天候状態（調達日射量と散乱日射量との比率）、太陽高度、走行方位にも強く影響を受ける。ここでは、国際規格 IEC61853-4 で規定されている Temperate Coastal 気候区での標準日射データベースで車両方位を乱数で与えた計算結果を示している。

曲面損失は浅い直達光が当たると悪化する。一方、浅い直達光は建物の影になりやすい。そのため、日影損失が大きくなるビル・山間部で小さくなる傾向にある。同様に、自己影の影響を強く受けるので、エンジンフード、ルーフ前部、ルーフ後部、リア部とブロック化して独自の MPPT で動作させることにより、自己影の影響を回避して曲面損失を大幅に低減することができる。

なお、表 2.1-8 は曲面太陽電池の計測方法 IEC60904-1-3（現時点、審議中）で計測したモジュール出力に掛け合わせて発電量を計算するときの補正係数であり、曲面を被覆するセルを平面に並べた時の合計出力に対しては適用できない。

表 2.1-7 水辺面での日射障害物による補正係数

IEC61853-4 による気候区分類	郊外	住宅地	高層ビル・山間部
High elevation	0.92	0.68	0.45
Subtropical arid	0.93	0.69	0.45
Subtropical coastal	0.92	0.71	0.49
Temperate coastal	0.90	0.67	0.46
Temperate continental	0.91	0.66	0.43
Tropical humid	0.93	0.74	0.54

表 2.1-8 車体曲面による補正係数

	エンジンフード	ルーフ前方	ルーフ後方	リア
日射量補正係数 (ランダム光線)	0.914	0.984	0.980	0.919
発電出力補正係数 郊外 IEC61853-4 Temperate Coastal	0.952	0.968	0.965	0.966
発電出力補正係数 住宅地 IEC61853-4 Temperate Coastal	0.969	0.971	0.966	0.968
発電出力補正係数 ビル・山間部 IEC61853-4 Temperate Coastal	0.971	0.975	0.968	0.971

部分日影による損失も、快晴時での走行時に発電出力が急落する頻度をカウントすることにより発生確率を計測出来る。太陽高度が高い夏の昼間の運転では概ね数%であるが、太陽高度が低くなる冬の昼間の運転では 10%という計測結果であった。ただし、住宅地など、架空の電線によって頻繁に部分日影がかかる場合などは発生頻度が 20%近くに及ぶ。部分日影による発電急落は、太陽電池の一部が影になることにより、その部位が直列回路内を流れる電流のボトルネックとなることにより発生する電力損失で、一般の太陽光発電システムでも普通に観測される現象である。ただし、車載太陽電池では、取り付け箇所および走行する道路の日射環境によって高頻度で大きな影響となって発現するため、発電量評価目的ではこの補正が必要となる。

- ・ 部分日影によって発電量が低下した場合、同様に日射量も低下しているため、この部分を逆補正しないと表 2.1-7 に示した日影による日射補正をダブルカウントしてしまう。部分日影の大きさの分布はランダムであり、発生時の日射量の低下も概ねその期待値に相当する 50%となる。したがって、影響度については 1/2 と算定しなければならない。
- ・ 部分日影が発生するのは晴天時のみである。曇天時は直達日射がないので、部分日影損失が発生しない。部分日影が発生する天候の発現率は概ね日照率に対応し、日本全国平均では 46%程度である。したがって、年間発電量への影響度を評価する場合、逆補正として 0.46 倍しなければならない。
- ・ 部分日影によりセルが影となっても、散乱日射量はほぼ不変であるため、全天日射に対する散乱日射比率の発電量は確保される。つまり、ほぼゼロとなるわけではない。
- ・ 部分日影の原因となる街路樹や標式は、郊外では車体に部分影を落とすことになるが、高層ビル地区や山間部では、背後の建物や山などの日影になっている場合が多く、日影障害物が多い地区では部分日影損失割合が高くなるというのは誤った認識である。通常、住宅地での部分日影発生確率の方がビル・山間部より高くなる場合が多い。

部分日影に対して頑健なモジュールはさまざまな研究機関から提案されている。また、部分日影は車載太陽電池のみならず、全ての太陽電池モジュールに共通の問題となるため、2010 年前後に盛んに研究が行われ、この影響を最小化するための構造については多くの論文が発表された。

ただし、この効果を検証する実験は、意図的にセルの一部を遮蔽したり（実際には散乱日射分はセルに入射する）、晴天時の観測結果のみ（実際は曇天時もある）から効果を提示している場合が多く、現実の天候や日影条件と乖離しているケースもある。この実験結果をそのまま読むと、部分日影が年間発電量に及ぼす影響は甚大となる等、印象操作に陥ってしまう危険がある。

日影の影響と同じく、障害物の高さ分布（正確には、日影の輪郭線の高さ分布、および 2 重日影の可能性を排除）、太陽高度、天候の季節分布、直達日射比率の時刻・季節変動などの重み付けを行って、1年間で集計することにより、部分日影の影響を期待値として算出することができる。その結果を表 2.1-9 に示す。

表 2.1-9 部分日陰による損失の補正係数

発電出力補正係数	郊外	住宅地	高層ビル・山間部
IEC61853-4 での全気候区	0.99	0.97	0.98

2.1.2 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

(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 2.1-7 と図 2.1-8 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 2.1-10 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 40kWh の車両駆動用バッテリーに蓄電される。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 パネルは六つ、フードとリアゲートの PV パネルはそれぞれ二つの PV 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 化合物 3 接合型太陽電池を使用している¹²。PV 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 60V 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 2.1-7 実証実験車両の外観

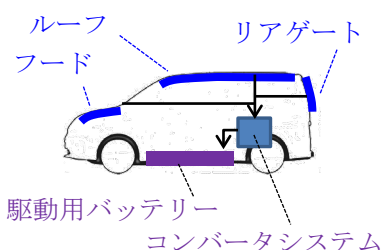


図 2.1-8 実証実験車両の太陽光発電システム

表 2.1-10 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)

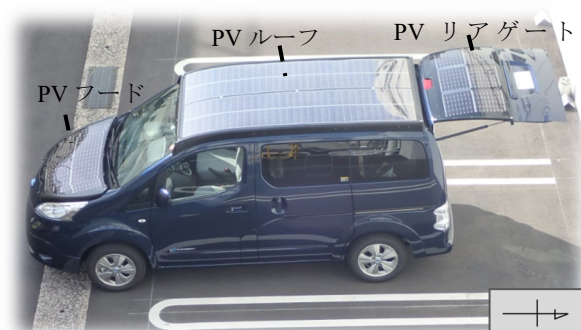
(2) 発電量と走行可能距離、充電頻度削減の実力把握

① 年間発電電力量と走行可能距離

i) 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 2.1-9 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¹³。

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 2.1-9 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。

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

a) 一日の日射量（Er）

- ・ NEDO 日射量データベース（METPV-11）¹⁴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 2.1-10）。

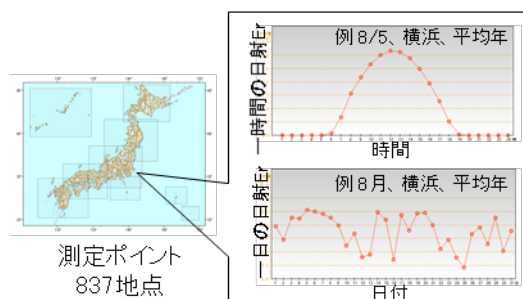


図 2.1-10 NEDO 日射量データベース ¹⁴

b) 日射・発電係数（日射量（ E_r ）と発電エネルギー（ E_g ）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 2.1-11）。
- 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。

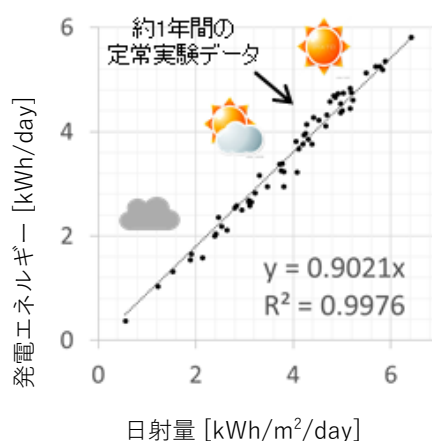


図 2.1-11 発電量評価時の発電エネルギーと日射量の関係

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 6km/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。

ii) 年間発電電力量と EV 走行可能距離の算出結果

図 2.1-12 に月毎の一ヵ月分の発電エネルギーと月平均の一日当たり発電エネルギーを示す。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。

図 2.1-13 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 7,100km、一日あたりでは平均で約 20km 走行可能であることがわかった。図 2.1-12 に示す

ように、一カ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。

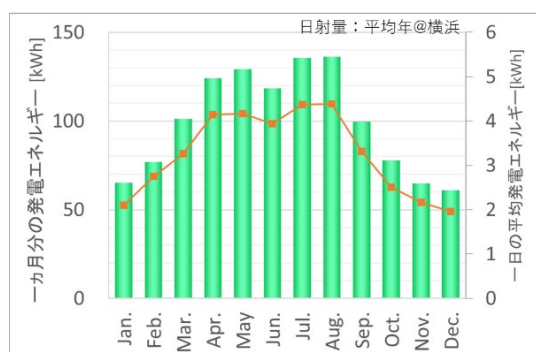


図 2.1-12 月ごとの発電エネルギーと一日あたり発電エネルギー（月平均）

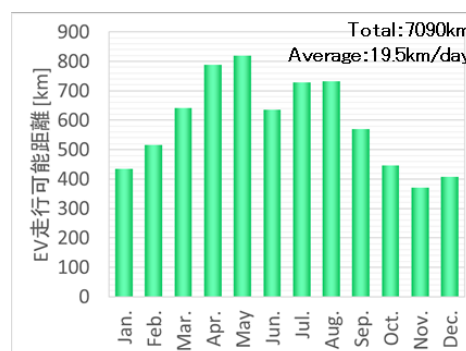


図 2.1-13 月ごとの EV 走行可能距離

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。

i) 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）¹⁵に記載の代表的な自動車利用パターンを参考に、「A：休日利用、B：平日休日利用、C：平日通勤利用」（表 2.1-11）とした。

表 2.1-11 代表的な自動車利用パターン抜粋¹⁵

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
A 休日利用	A-1 休日レジャー 長距離型	150km @2 日間 (土曜日、日曜日)	遠距離先へのレジャー等で休日（土曜日、日曜日）にのみ利用。
	A-2 休日レジャー 短距離型	50km @2 日間 (土曜日、日曜日)	近距離先へのレジャー等で休日（土曜日、日曜日）にのみ利用。
B 平日休日利用	B-1 アクティブ 利用型	50km @4 日間（月水金日）	シニア世代など、休日、平日問わずアクティブに利用。
	B-2 近郊街乗り 利用型	5km @4 日間（月水金日）	主婦層など、休日、平日問わず、近郊の店舗などへの買い物に利用。
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）	近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及び太陽電池発電電力の利用率を下式により算出した。算出条件は表 2.1-12 のとおりである。

$En_{Ba_{n+1}}$	$= En_{Ba_n} - Di_{Dr_n} + En_{So_n}$
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）
U	$= \frac{\sum_{n=1}^{365} Di_{Dr_n} \times Ef_{Dr_n} - \sum_{n=1}^{365} En_{Ca_n}}{\sum_{n=1}^{365} En_{So_n}}$
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
En_{Ca_n}	: n 日目の充電エネルギー
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
U	: 太陽電池発電電力利用率

表 2.1-12 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

ii) 充電頻度削減効果の算出結果

A 休日利用

図 2.1-14 に休日 25km/day~200km/day 走行する場合の、太陽光発電有りの場合と無しの場合の年間の充電回数と、太陽電池発電電力の利用率を示す。充電不要となる運用を達成できるのは走行距離が 50km までである。図 2.1-14 に示す通り、条件によって利用率や充電回数削減効果がバラバラなのが特徴である。これは、利用する日は休日だけであるため、太陽電池発電電力を十分に活用できていないことを示している。

B 平日休日利用

図 2.1-15 に平日と休日に 5km/day~100km/day 走行する場合の、太陽光発電有りの場合と無しの場合の年間の充電回数と、太陽電池発電電力の利用率を示す。充電不要となる運用を達成できるのは走行距離が 25km/day までであるが、走行距離 50 km/day 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、走行距離 50km/day 圏の場合は、年間充電回数を 65%程度削減できる見込みである。また、利用率も走行距離 50km/day 以上では 90%程度であり、A 休日利用と比較して利用する日が多いため、太陽電池発電電力を十分に活用できていることを示している。

C 平日利用

図 2.1-16 に通勤距離が片道 10km~30km 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と、太陽電池発電電力の利用率を示す。充電不要となる運用を達成できるのは通勤距離が 10km までであるが、通勤距離 10km 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 25km 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。また、利用率も通勤距離 15km 以上では 90%程度であり、A 休日利用と比較して利用する日が多いため、太陽電池発電電力を十分に活用できていることを示している。

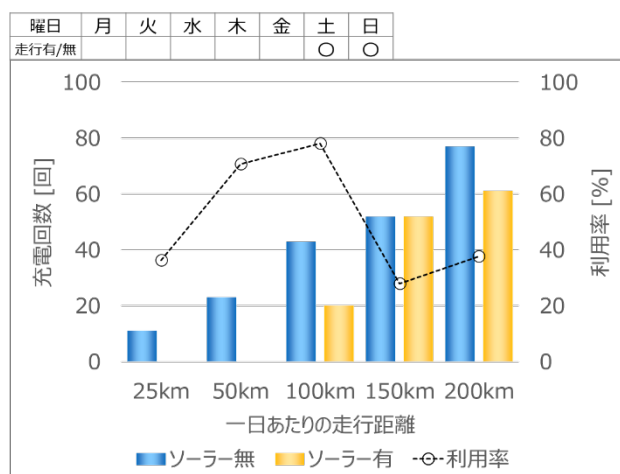


図 2.1-14 休日利用時の年間バッテリー充電回数

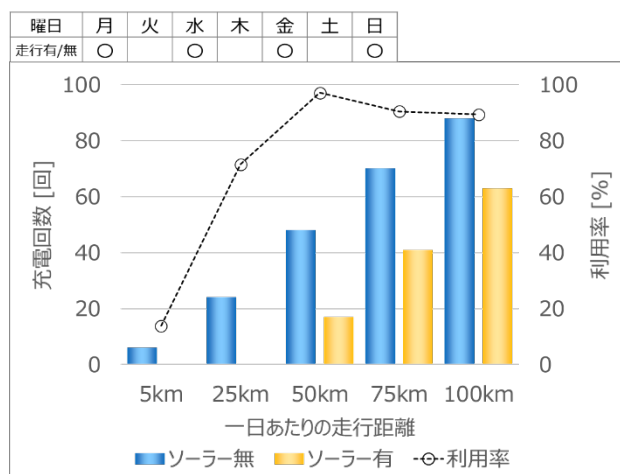


図 2.1-15 平日休日利用時の年間バッテリー充電回数

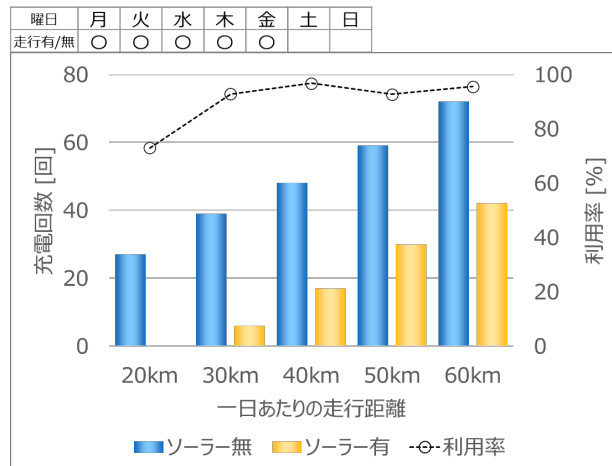


図 2.1-16 通勤使用時の年間バッテリー充電回数

(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 2.1-13）。以降に、それぞれの日射変動への対応について報告する。

表 2.1-13 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	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>	日射量の急激な変化に <u>発電制御が追い付かない</u>

② 部分的な影への対応

i) 対応策

図 2.1-17 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（PV）モジュール

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 PV 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 PV モジュールの電力を昇圧することが可能である¹⁶。

図 2.1-18 は各 PV モジュールの PV セルの接続方法を示している。PV スtring は 16 直列した PV セルで構成され、これを 11 並列にすることで PV モジュールを構成する。この接続方法の影響により、図 2.1-18 の Shadow A のように影がかかる場合は PV セルの並列方向が影に覆われていくので、PV モジュール電圧が下がらずに電流が下がる (図 2.1-19)。一方で Shadow B のように影がかかる場合は、PV セルの直列方向が影に覆われるため、面積が増えるに従い PV 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。

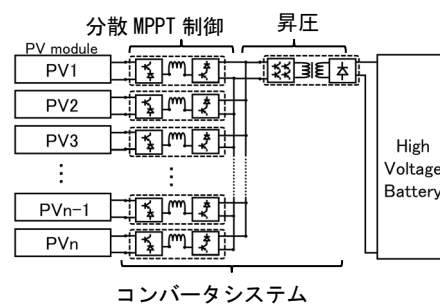


図 2.1-17 コンバータシステム概要¹³

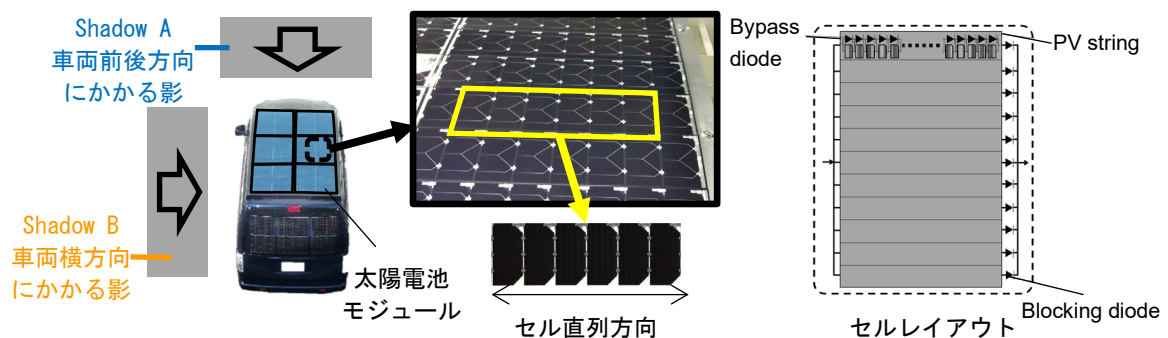


図 2.1-18 太陽電池セルレイアウトと車体及び影との位置関係

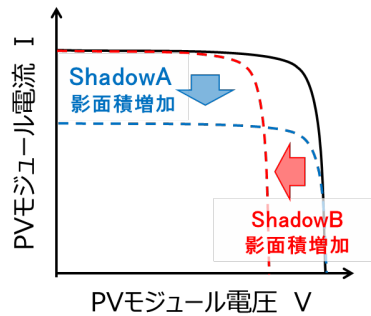


図 2.1-19 PV モジュールの IV 特性

ii) 評価結果

図 2.1-18 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 2.1-20 に Shadow A と Shadow B の時の影面積に対する正規化したループ電力の関係を示す。なお正規化は影面積率が 0%の時のループ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プ電力も低下したが、Shadow B は階段状に正規化ループ電力が低下した。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 2.1-21 (a) は Shadow A の影面積 17% (1/6) の時の正規化した PV 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 PV 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 2.1-21 (b) は Shadow B の影面積 12.5% (1/8) の時の正規化した PV 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。

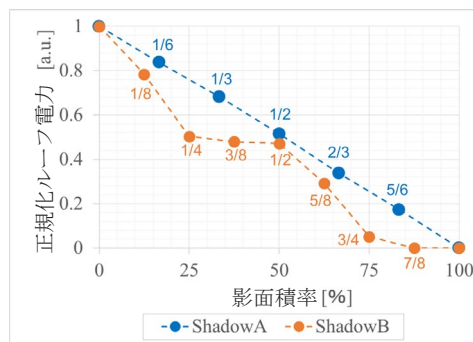


図 2.1-20 影面積率と正規化ループ発電電力 ¹⁶

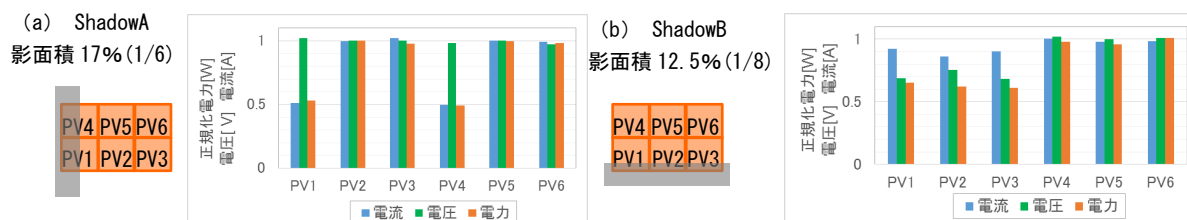


図 2.1-21 正規化した PV モジュール電力、電圧、電流 ¹⁶

② 過渡的な日射変動への対応

i) 対応策

図 2.1-17 のコンバータシステムにおいて、各 PV 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 PV 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 PV 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。

ii) 実験方法（公道走行による評価）

図 2.1-22 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 2.1-23 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 PV 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 2.1-22 評価シーン

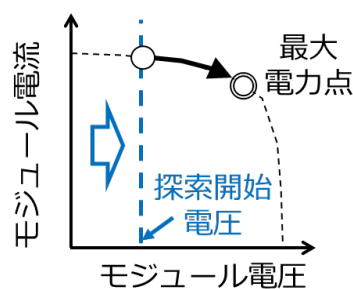


図 2.1-23 MPPT 制御の探索開始電圧

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

: 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

iii) 実験結果

図 2.1-24 に MPPT 制御探索開始電圧に対する MPPT 達成率の関係を示す。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 40V 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 38V 程度であるため、定常的に MPP で運転できなくなってしまったと推察される。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。

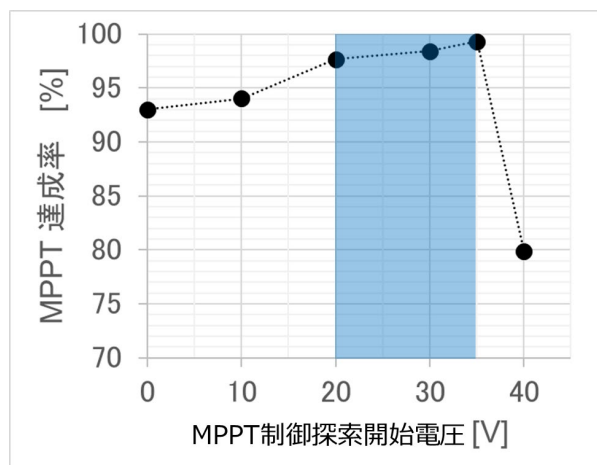


図 2.1-24 MPPT 制御探索開始電圧と MPPT 達成率の関係¹³

図 2.1-25 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。

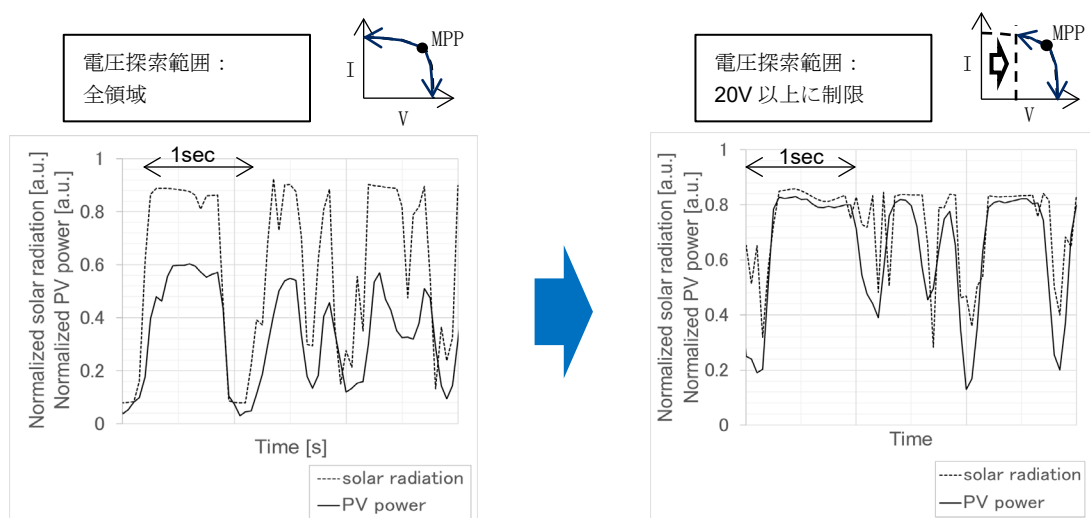


図 2.1-25 日射量と PV ルーフの発電電力の関係¹³

2.2 商用車への太陽光発電搭載

近年、欧州を中心に商用車への太陽光発電搭載への取り組みが活発化しており^{17,18}、米国でも冷蔵トレーラーへの太陽光発電搭載実証が開始されている¹⁹。

乗用車への太陽光発電搭載では、基本的に電気自動車（プラグインハイブリッド車含む）への搭載が想定されるが、商用車においては、電動車両のみならず、車両走行自体は内燃機関であっても、走行中に車両内やトレーラー、コンテナが消費する電力を太陽光発電電力で代替することが可能であり、内燃機関による走行車両への太陽光発電搭載も実現、推進することで、太陽光発電搭載の対象車種や市場が飛躍的に拡大することも期待される。

その一方、商用車には様々な車種、用途があり、車両形態や車両の運用形態に加え、発電電力の使用形態も多岐にわたり、多くのユースケースが存在するが、これらのユースケースは発電性能に大きく影響し、太陽電池搭載の効果も大きく変動すると考えられる。太陽光発電システム搭載自動車が普及していくためには、これらの影響を考慮した各種ユースケースにおける発電量の推定および太陽電池を搭載した移動体の市場投入効果の推定が重要となってくる。

このような背景のもと、NEDO では「新市場導入に向けた発電量予測技術の開発」として、早期の実用化が求められる太陽光発電システム搭載自動車について、より効果的な市場投入方法を検討する手法を開発するため、2023～2024 年度にかけて、商用車を対象とした以下のプロジェクトを実施している（表 2.2-1）。

ここでは、これらのプロジェクトの概略とこれまでに得られている一部の結果を紹介する。

表 2.2-1 NEDO「新市場導入に向けた発電量予測技術の開発」による実施プロジェクト

テーマ名	PV 搭載 EV システム設計技術の開発	多様な商用車車載太陽光発電の実証と効果予測技術の開発
実施事業者	産業技術総合研究所 (再委託) 早稲田大学	システック(株) 宮崎大学 太陽光発電技術研究組合 (PVTEC)
実証対象車両	電動車両 (トラック、ワンボックス等)	ディーゼル車 (トラック、トレーラー等)
太陽光発電電力用途	駆動用電力補助	電装品等の電力補助
搭載する太陽電池	市販結晶 Si 太陽電池	市販 CIGS 太陽電池
開発目標	・ 実証試験による発電量推定技術 ・ 二次電池の充放電シミュレーション技術 ・ 上記からの PVEV システム設計技術開発と導入効果・導入モデルの提案	・ 実証試験による発電量推定技術 ・ 多岐にわたる商用車使用形態での燃料消費および CO₂ 削減効果推定 ・ 太陽光発電システムの後付け工法の検討 (接着法による検討)

2.2.1 電動商用車への太陽光発電搭載

国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研）では、2023 年度より NEDO の支援を受け、電動商用車を対象とした PV 搭載に関するプロジェクト「PV 搭載 EV システム設計技術の開発」を推進してきた。図 2.2-1 にプロジェクトの全体像を示す（産総研では、PV 搭載電気自動車を PVEV と呼んでいる）。2 つのサブテーマから構成されており、それぞれ (1) 太陽電池搭載 EV による実証走行、(2) PVEV システム設計技術の開発となっている。本項では、各サブテーマの取り組み内容および主な成果について概説する。

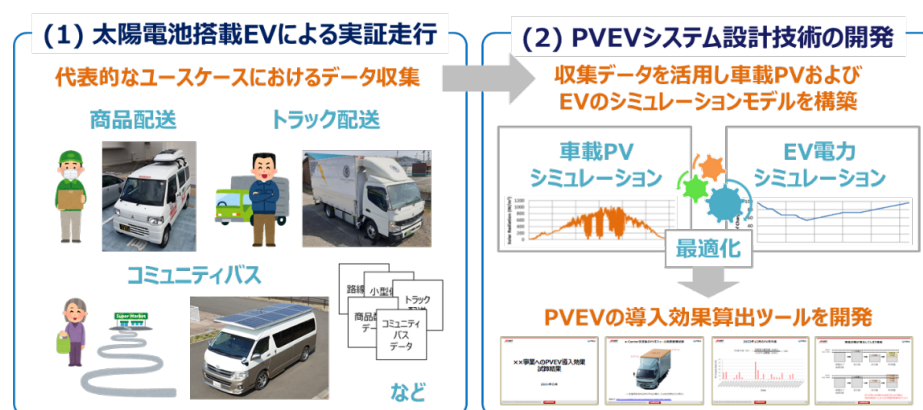


図 2.2-1 産総研「PV 搭載 EV システム設計技術の開発」プロジェクト

(1) 太陽電池搭載EVによる実証走行

車両への PV 搭載効果は、使用する車両のタイプ・走行場所・走行時間帯により異なるはずである。そこで、産総研が開発した実証車両（PVEV：PV モジュールを搭載した EV 車両であり、PV 電力が実際に EV 走行に利用可能、PYEV：PV モジュールの代替として日射計を搭載した EV 車両、日射データから想定される PV 電力と EV 消費電力の突合せにより PV 搭載効果を算出）を世の中で実際に行われているいくつかのサービスに導入し、PV 搭載効果を検証するためのデータ取得・事例分析を行った。

① 商品配送

軽商用バンを用いた近距離配送（いわゆるラストワンマイル配送）は、PVEV の活用先として特に有望なユースケースであると考えられる。株式会社ヨークベニマルの協力のもと、同社が行っている商品配送サービス用車両として産総研の PYEV を導入し、実サービスの中で各種データ収集を行った（実施期間：2022 年 2 月～2024 年 12 月）。図 2.2-2 に実証車である小型バンタイプ PYEV の外観を示す。ベース車両として三菱自動車工業株式会社の軽商用 EV バン（MiniCAB MiEV、バッテリー容量 16kWh）を用い、ルーフボックスに搭載した PV モジュール型日射センサー（裏面に熱電対貼付）により日射強度とモジュール温度を、GPS センサーにより位置情報を、車内テレマティクス端末により SOC 等の車両データを取得可能とした。



図 2.2-2 小型バンタイプ PYEV

取得データの例として、2022 年 2 月 22 日の場合を示す。図 2.2-3a は当日のバッテリー SOC データである。前日の配送で消費したバッテリーを朝から充電開始、昼にかけて満充電とし、14 時前から 16 時過ぎまでの配送によりバッテリーを 62.5% (10 kWh に相当) 消費したことが確認できる。図 2.2-3b は当日の実証車ルーフへの日射強度データである。この日の天候は薄曇り、配送中（赤点線枠）を含めたデータの取得が行われたことが確認できる。取得した日射強度データから、車体ルーフ面積約 2.7 m² に変換効率 20% の PV モジュールを搭載した場合（発電容量 540 W 相当）の発電電力量を見積もったところ、1.3 kWh となった。これは、先述のバッテリー消費量 10 kWh に対しては 13% に相当していた。

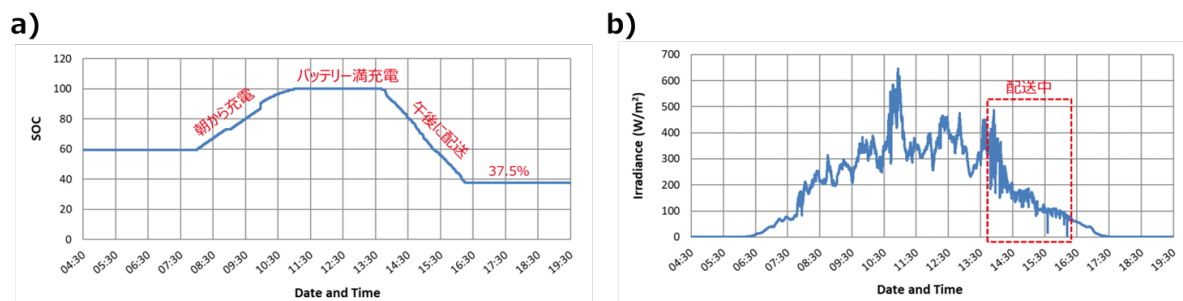


図 2.2-3 a) バッテリー SOC データ、b) 日射強度データ

同様のデータ処理を日々（配送が行われた日に限り）行うことで、日ごとの PV 供給率（PV 推定電力量とバッテリー消費量の割合）を算出し、月ごとに平均をとったものが図 2.2-4 である。冬季（12～2 月）は走行に加えエアコン（ヒーター）によるバッテリー消費もあるため、PV 供給率は 10～20% 程度となった。対して、日本において PV が特に活発かつ配送中のエアコン使用もそれほど多くない 4・5 月においては、PV 供給率は 60～70% 程度に達する可能性が示唆された。各月の PV 供給率の更に平均をとることで、年間（2022 年 2 月～2023 年 1 月）の PV 供給率は 44% と推定された。これは、系統からの充電にかかる電力コストを同程度削減できること意味し、PV 搭載は長期的には大きなメリットをもたらすポテンシャルがあると言える。

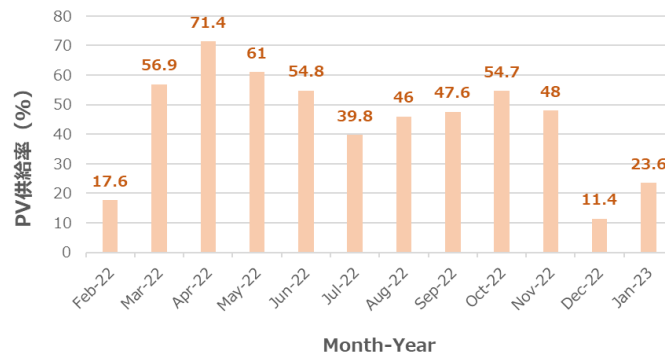


図 2.2-4 各月の PV 供給率（商品配送ユースケース）

上記の議論は、配送が行われた日に限り日射から算出した発電電力量とバッテリー消費量の単純な比較を行ったものであり、配送が行われなかった日（バッテリー消費量がゼロの日）については除外したものとなっている。ただし、実際の商品配送サービスにおいては、多くの PV 発電が見込める（つまり天気が良い）にもかかわらず配送が行われない日もある（ヨークベニマルはそもそも土日は配送サービスを行っておらず、また平日であっても注文が入らない日などもある）。この場合、EV への充電を計画的に行わなければ、バッテリーがすでに満充電状態のため PV 電力が充電されない状況（PV 抑制）なども起こりうる。特に本商品配送サービスでは、EV を「朝から充電開始、昼にかけて満充電」（図 2.2-3a 参照）しているため、その日の出発前までに得られる PV による充電量を予測し（例えば SOC 10%分と予想）、それに基づき朝から開始する充電を制御し（SOC 90%となった時点で充電停止）、出発直前に SOC が 100%となるような充電オペレーションが理想となる。こうしたスマートな EV 充電オペレーションを行ったと仮定しデータの再分析を行ったところ、2022 年 2 月から 2023 年 1 月の 365 日における総 PV 電力量見積 490.4 kWh に対し、抑制電力量は 52.3 kWh（10.7%）に達すると試算された。つまり、スマート EV 充電オペレーションを行ったとしても、PV 抑制を完全に防ぐことはできないことが示唆された。PV 抑制電力をゼロに抑えるためには、車両から他（グリッドや店舗等）へ電力を融通する、いわゆる V2X 機能を付与することが必要となる。

② トラック配送

商品配送とは異なるユースケースとして、EV トラックを用いた配送においても調査を行った。帝北ロジスティクス株式会社（本社：福島県福島市）の協力のもと、同社が使用していた EV トラック（三菱ふそうトラック・バス株式会社 e-Canter、バッテリー容量 81 kWh）の架装ボディルーフに太陽電池モジュール型日射センサーを取り付け、EV トラックタイプの PYEV とした。図 2.2-5 に同車両の外観を示す。車内には CAN ロガーおよび GPS センサーを取り付け、商品配送ユースケースと同様の車両データ（SOC データ）および位置情報データを取得可能とした。データ取得は 2023 年 12 月から 2024 年 11 月までの 1 年間行った。



図 2.2-5 トラック PYEV

取得データの分析に関しては、EV トラックにおいては架装ボディルーフ面積約 10 m²に変換効率 20%（発電容量 2 kW 相当）の PV モジュールを搭載したという想定のもと、商品配送同様の処理を行った。つまり、配送が行われた日ごとの PV 供給率を算出し、さらに月ごとの平均値としてまとめた。図 2.2-6 にその結果を示す。12 月が最も PV 供給率が低く、5・6 月に特に高い数値となっており、これは商品配送と同様の傾向であった。月ごとの PV 供給率の平均として得られる年間の PV 供給率は 35%であり、商品配送の場合よりは低下していた。この理由の一つとしては、一日当たりの走行距離の違いにあると考えられる（本事例のトラック配送は約 30 km/日、先の商品配送は約 15 km/日）。

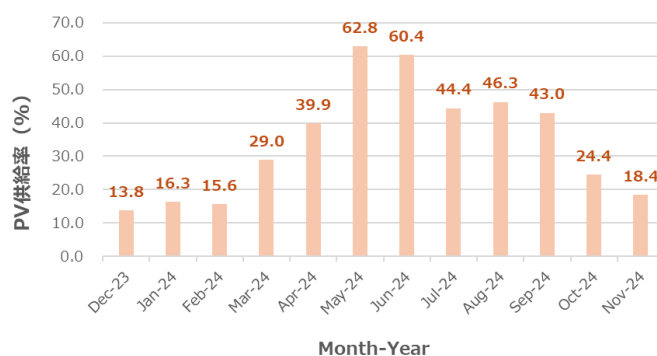


図 2.2-6 各月の PV 供給率（トラック配送ユースケース）

トラック配送においても、PV 抑制電力の見積りを試みた。本トラック配送の場合、車両は基本的に朝から利用されているため、充電オペレーションは「（配送業務終了後の）夕方から夜間に充電開始、朝までに満充電」であり、商品配送の「朝から充電開始、昼にかけて満充電」とは異なる。したがって、商品配送の時には必要であった「その日の出発前までに得られる PV による充電量を予測」は不要であり、例えば常に SOC 95%まで充電と決めることで十分である。こうした本トラック配送に適した充電オペレーションおよびトラック配送の行わなかった日の PV 電力量も加味して算出した抑制電力量は 95.5 kWh であり、これは総 PV 電力量見積 1803.9 kWh の 0.8%となった。先述の商品配送の 10.7%に比べて大幅に低下しており、その理由は車両が朝から使われているため PV 電力のスムーズな吸収（活用）ができるためと考えられる。つまり、PVEV は朝から使われるユースケースで特に有効であると言える。

③ コミュニティバス

先の2例はPYEVによる仮想的なPV搭載効果試算であったが、実際にPVEVを用いた評価としてコミュニティバスを検討した。図2.2-7に用いたPVEVの外観を示す。元来ガソリン車であったトヨタ自動車株式会社ハイエース（10人乗り）をEV化し（バッテリー容量39.4 kWh）、PV電力を直接利用可能な仕様とした（発電容量1.12 kW）。同車両を福島県福島市立子山地区におけるコミュニティバスを想定した運用の中で各種データ取得を行った（2023年9月から2024年8月まで）。走行条件は1回あたり約25 kmの走行ルートを午前・午後各1回走行（合計で約50 km/日）とした。



図 2.2-7 コミュニティバス PVEV

図2.2-8aにPVデータの例を示す。この例においては、一日の積算発電電力量は3.94 kWhであった。図2.2-8bは同日のバッテリーSOCデータである。PV充電によるSOCの増加、2度の走行によるSOCの減少、PVと系統からの同時充電によるSOCの増加の様子が見て取れる。この日の走行に使用した電力量は10.37 kWhであった。したがって、この日のPV供給率は28%と算出できる。同様の計算を2023年9月から2024年8月までのうちの140日間、様々な気象条件下において得られたデータをもとに行ったところ、平均でのPV供給率は13.5%となった。商品配送・トラック配送におけるPV供給率よりも低い値となったのは、やはり走行距離が関係していると考えられる。他方、本実験で用いたPVEVはあくまで試作車であり、用いたPVモジュールの性能・重量、内部の電力変換システム（DCDCコンバーター等）に関しては大いに改善の余地がある。より完成度の高いPVEVを用いることで、さらなるPV供給率の向上＝電力コストの削減、CO₂排出量の削減等の効果が期待できる。

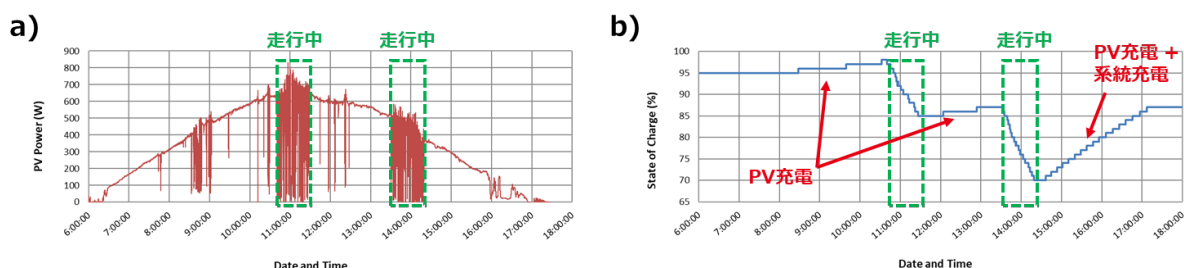


図 2.2-8 a) PV データ、b) SOC データ

最後に、上記①～③のまとめとして各ユースケースの PV 搭載量、PV 供給率、一日当たりの走行距離の比較表を表 2.2-2 に示す。

表 2.2-2 各ユースケースの結果比較

ユースケース	商品配送	トラック配送	コミュニティバス
車両			
PV搭載量	0.54 kW (想定)	2.0 kW (想定)	1.12 kW (実際)
PV供給率	44.0%	35.0%	13.5%
一日当たり 走行距離	15 km	30 km	50.0 km

(2) PVEVシステム設計技術の開発

PVEV システム設計技術とは、図 2.2-9 に示すように、あるユースケースにおける車両の使い方（運行情報）を与えることにより、PVEV がそのユースケースにおいて効果的に導入できるか等を判断するためのツールを指す。前節で述べた各種ユースケースの取得データを活用することで、そのようなツールの実現に必要な二つの要素技術（車載 PV 発電電力量推定技術および EV 電力消費・充放電シミュレーション技術）を開発した（EV 電力消費・充放電シミュレーション技術に関しては早稲田大学と共同で開発）。また、これらの結果を融合し PVEV の導入効果を推定する手法（最適設計アルゴリズム）を開発した。

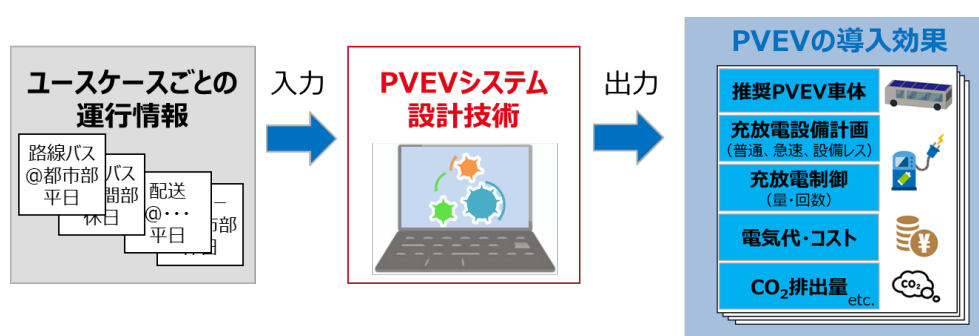


図 2.2-9 PVEV システム設計技術のイメージ

① 車載PV発電電力量推定技術

車載 PV の場合、地上設置 PV に比べよりダイナミックな日射変動が起こるため、車載 PV に特化した日射量推定手法を確立する必要がある。そこで、GIS（地理情報システム）と DSM（数値表層モデル）データを利用した走行ルートの日陰パターンシミュレーションと衛星観測に基づく日射量推定（太陽放射コンソーシアムの AMATERASS データ）を組合せ、時系列データとして日

射が推定可能な手法を開発した。さらに、PV モジュールの温度特性や PV 以降の機器（PV と EV のバッテリー・モーター等をつなぐ機器）の構成・性能（MPPT 効率、DCDC 変換効率等）を反映させた「日射⇒発電ロジック」を確立し、車両の位置情報を入力データとすることで発電推定値を算出する手法を開発した。図 2.2-10 に一連のフローチャートを示す。

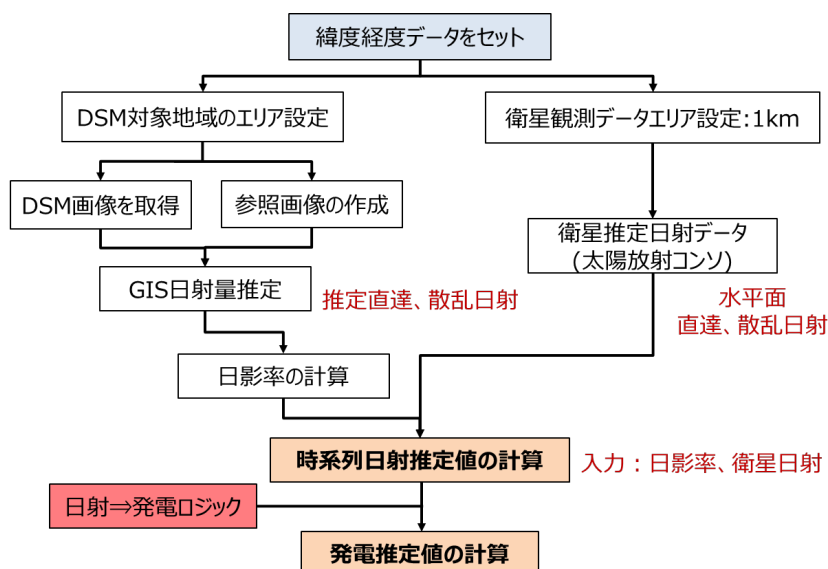


図 2.2-10 車載 PV 発電電力量推定フローチャート

開発手法による発電推定結果と実測データとの比較例を図 2.2-11 に示す。走行中の発電変動を比較的良好に再現できていることが確認できる。他方で、停車中においては、本例では 8～9 時および 14～15 時において実測データとの乖離が見られている。これは、利用している DSM データの精度に依存していると考えられる（DSM データに含まれていない小さな構造物、例えば電柱等による日影が再現できなかったため）。このように、実測値の細かな再現には一定の限界はあるが、他の日の計算結果も含めた場合、日積算レベルの発電電力量比較においては概ね±10%内の精度で再現できる可能性を確認しており、最終的な PVEV の効果算出にとって十分有意義な情報を与えることが可能である。

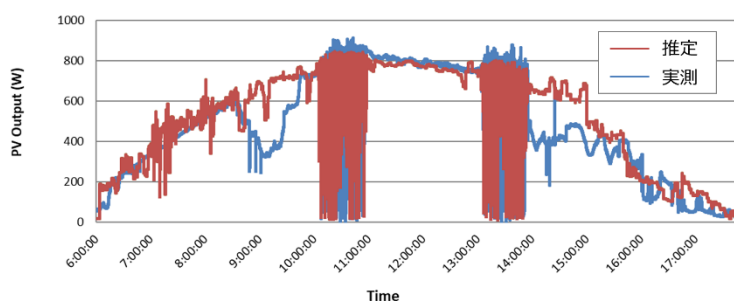


図 2.2-11 車載 PV 発電電力量推定（赤線）と実測 PV データ（青線）との比較

② EV 電力消費・充放電シミュレーション技術

EV のシミュレーションモデルは、これまでも様々なものが報告されているが、いわゆる

WLTC モードに沿ったものが多く、特に外気温の影響や山間部の勾配路などを含めたリアルワールドにも適用可能なモデルはほとんどない。そこで、太陽電池搭載 EV による実証走行データの解析結果をもとに、リアルワールドでの EV の電力消費・充放電量を推定可能なシミュレーションモデルを開発した。図 2.2-12 にそのフローチャートを示す。本手法は、車両タイプおよび走行ルートを特定し、走行中の道路勾配・車両速度・外気温を入力し、EV パワートレインの運動方程式モデルに基づき駆動力・駆動・補機電力消費を計算することで、電力消費率を算出する。さらに、バッテリー充放電電力によるバッテリー残存容量 SOC を推定することが可能である。

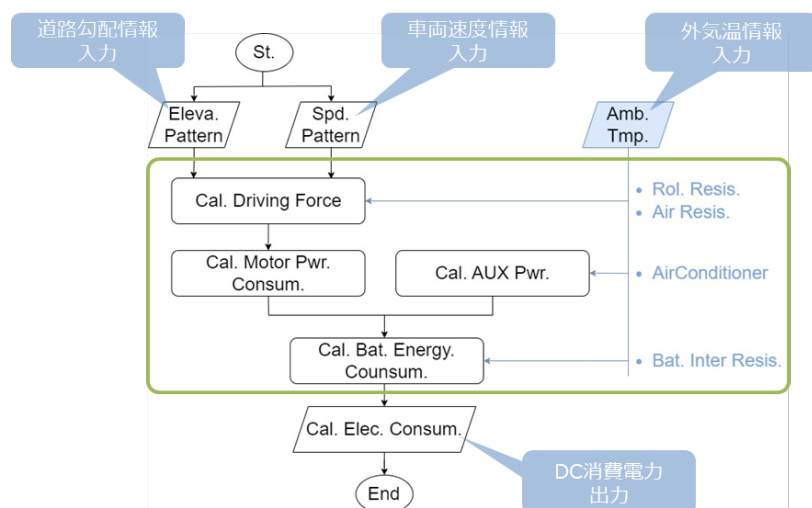


図 2.2-12 EV 電力消費・充放電シミュレーションフローチャート

開発手法の評価結果の一例を図 2.2-13 に示す。ここでは、商品配送ユースケースで用いた小型バンタイプ PYEV の実測 SOC データと開発手法による SOC シミュレーション結果を比較している。図 2.2-13a により、シミュレーション計算結果（赤ライン SIM）は実測値（青ライン DATA）と同等であることがわかる。また、走行条件や気象条件の異なる 30 トリップ（走行距離 1.5～3.9 km、外気温 -1.0～+32.3 °C）でも比較検証を行なった（図 2.2-13b）。26 トリップが最大電力消費 1.127 kWh の±10%範囲内に収まり、シミュレーションモデルの電力消費推定精度が確保されていることを確認した。

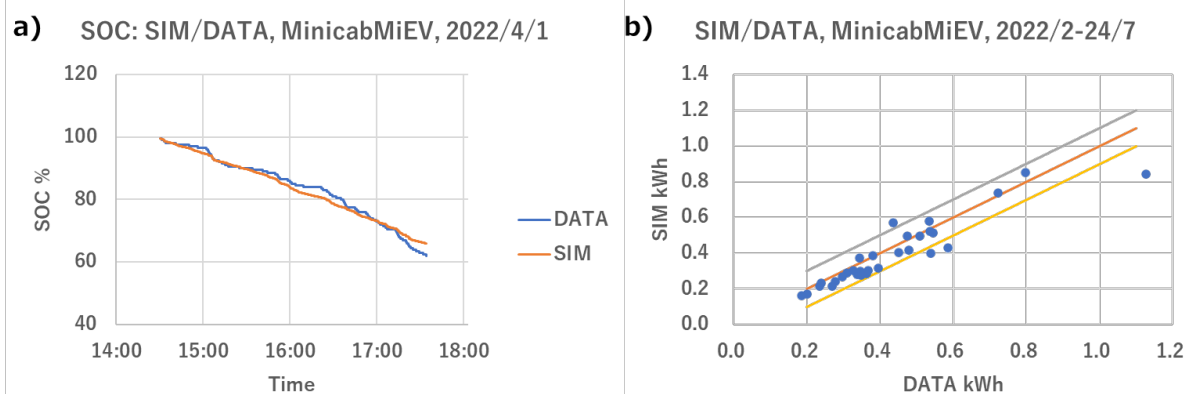


図 2.2-13 EV 電力消費・充放電シミュレーション結果と実測データの比較

: a) SOC の時系列 b) 積算値での相関

③ 最適設計アルゴリズム

EV 電力消費・充放電シミュレーションにより得られる EV の SOC シミュレーションを車載 PV 発電電力量推定により得られる発電電力データと融合することで、PV が搭載された場合の EV の SOC シミュレーションを行うことが可能である。この結果から、PV 供給率の計算や PV 抑制電力量を算出し、PV 抑制を最小化するための PV 搭載量を見積もる、または PV 抑制を一定程度許容した上での経済性（電力コスト削減）・環境性（CO₂ 排出量削減）・充電オペレーション（頻度・時間）の改善等の効果を見積ることができる。また、バッテリー搭載量の調整・車重削減・電費向上・充電制御機構設計等にフィードバックすることが可能である。こうした情報を車両ユーザーに提供することで事業車両として PVEV の導入判断、または車両メーカーに提供することで PVEV の設計指針・市場性検討材料として活用可能と考えられる。

2.2.2 内燃機関走行トラック・トレーラーへの太陽光発電搭載

㈱システックを中心とするプロジェクト「多様な商用車車載太陽光発電の実証と効果予測技術の開発」では、商用車への太陽光発電搭載による効果の定量評価技術の開発を主たる目的とし、200 台を超える多様な商用車への太陽光発電搭載とその実証データの取得、太陽光発電量の推定技術および導入効果推定技術の開発（誤差±20%）を目標としている。

【研究開発概要】

①200台規模の商用車車載PVの実証（PVメリットの定量評価）

秋田県等日照時間が著しく少ない地域、運送車、路線バスなど効果が不明瞭な場所に対する設置 20台程度

特殊車両（高所作業車、アーム車、農耕車など）10台

種々の車両、種々の運行形態、全国各地の商用車 100台～200台程度

※ 発電データの収集に際し、新規データロガーの設計を行う。

②上記メリットの定量評価技術の開発

走行パターン⇔発電量⇔燃料削減効果の評価技術、効果的な投入ガイドライン策定、EVトラックでの効果推定

⇒研究開発効果

①運輸部門のCO₂削減（ポテンシャル：700万トン/年）に向けたファーストステップ

②多様な商用車へのPV設置メリットの定量把握による効果的な商用車PV導入

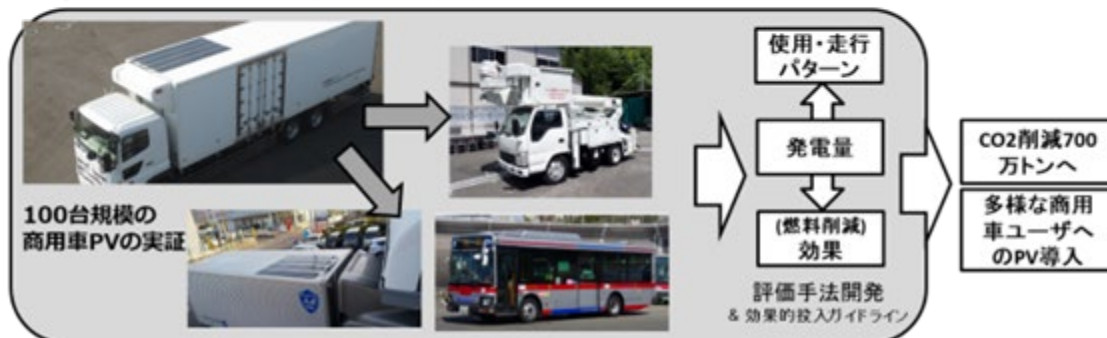


図 2.2-14 「多様な商用車車載太陽光発電の実証と効果予測技術の開発」プロジェクトの概要

ここでは、同プロジェクトによる太陽光発電量の予測および実測値の比較について概説する。

これまでに、全国を走行する 100 台以上の商用車に太陽光発電（フィルム型 CIGS 太陽電池モジュール）を搭載し、発電量を常時モニターすることにより、経路に偏らない車載太陽光発電のポテンシャルを把握するとともに、これまで研究開発されてきた車載太陽光発電の発電量予測技術の実証を行ってきている。

(1) 発電量予測へのアプローチ

発電量を予測するための日射データの計測や収集の前提となる視点や考え方は、2.1.1 に示した、

乗用車に搭載した太陽光発電の場合と同様であるが、商用車の場合は、概して、現象が比較的単純なため、商用車向け車載太陽電池の計測調査には、簡便な単一日射計測とシチズンサイエンスの手法を用いてサンプル数を増やし、公正かつ偏りない車載太陽電池の性能および発電ポテンシャル調査を行うことを重点化した（表 2.2-3）。

最終的に約 200 台のトラックに太陽電池を搭載し、電話回線を用いて発電データと走行データを収集するが、日々の輸送業務の傍らにデータ収集を行うため、繊細な日射計測は行わない。多様なトラックやさまざまな商用車にて効果を検証する目的で、北海道から沖縄まで、さまざまな輸送業者を層別抽出してデータ取得に協力いただいているが、日々の実際の輸送業務でのリアルなデータを収集するため、こちらから輸送経路や輸送スケジュールの要求は行っていない。

2024 年 3 月 8 日以降、データ収集を開始しており、2025 年 1 月 31 日時点での走行実績を図 2.2-15 に示す。この図は計測対象のトラックの位置を GPS で測地し、1 時間毎に緯度経度のメジアン地点を国土地理院地図上にプロットしたものである。山陰などやや手薄の地域があるものの、ほぼ日本全国から走行データ・走行中の発電データを収集することができている。

表 2.2-3 商用車における発電量予測へのアプローチ

- ・単一日射計測（注 1）
- ・200 台（注 2）
- ・ランダムルート（注 3）
- ・平面太陽電池
- ・自己影なし
- ・部分日影の影響小
- ・単接合太陽電池（CIS 系）
- ・協力いただいた輸送業各社のトラック運転手による自動計測・電話回線によるデータ送信
- ・主に走行中の日影により発電量変動
- ・日影確率モデルによる発電量予測 → 発電量データによる検証

- 注1) 太陽電池の発電量から逆算して日射量とした。頻繁に洗車を行い、稼働時間の長い（その分、長期にわたり振動や衝撃を受け続ける）トラック屋根面で、技術者の常時介在無しで精密な日射計の性能や精度を維持するのは困難と判断したため、日射計自体は搭載しなかった。
- 注2) 2024 年 2 月から太陽電池および計装システムを設置し始め、3 月 8 日から稼働開始した。その後、徐々に太陽電池と計装システムを設置した商用車（主にトラック）の台数を増やした。2024 年 12 月時点で、自費設置を含め、200 台の商用車に設置した。
- 注3) 走行経路は、あくまで各輸送業者の事業の枠内で行われ、意図的にランダムなルートを計画したものではない。北海道から沖縄までの広い範囲、かつ、地場輸送、長距離輸送などさまざまな種別の輸送業者を選び、計測モニター対象のトラックを層別選択することにより、日本全国の多様な走行モードでの車載面日射量および車載太陽電池性能を偏りなく定量化することを目指した。



図 2.2-15 調査に用いた商用車 200 台の国内走行実績
(国土地理院地図上に走行 GPS 記録を抽出してプロット)

(2) 発電量の予測と実測値との比較

車載太陽電池による発電量ポテンシャルを見積もる目的では、ランダムルートの走行データから確率モデルを適用して算定するといったアプローチが適切と考えられる。

本事業では、通常の業務内での発電およびその電力利用状況をモニターした。太陽光発電で発電を行っても全ての電力が燃料節約に用いられるわけではない。一部は直接ゲート昇降などの負荷に使われてバッテリーの放電電力を節約することにより、オルタネータ発電による軽油消費を節約することができる。また、太陽光発電電力の一部は直接バッテリー充電に用いられる。これらの電力潮流を把握するため、図 2.2-16 のような計測系を搭載してモニタリングした。

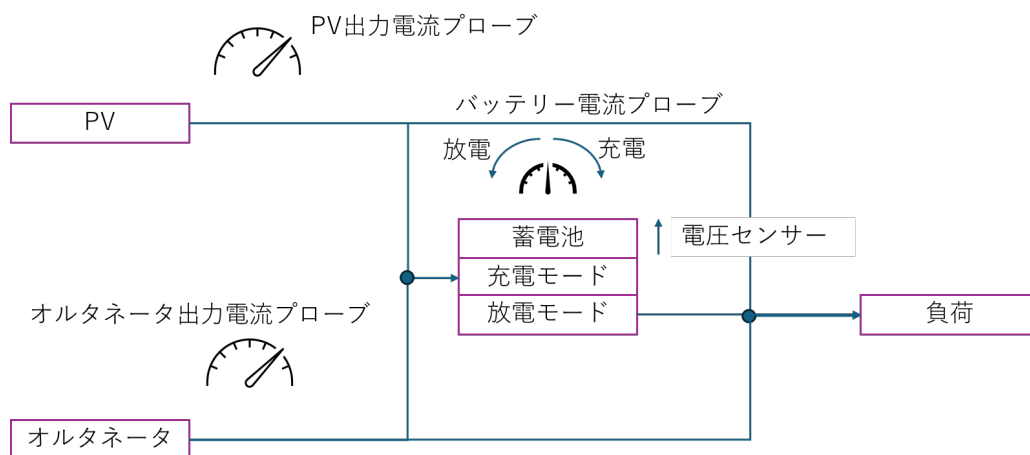


図 2.2-16 太陽光発電出力モニターの基本回路図

電力潮流計測結果例を図 2.2-17 に示す。負荷への電力に対する太陽光発電電力潮流とオルタネータ発電電力潮流の大小を比較することにより（負荷電力に対する太陽光発電電力の比率を調べるにより）、太陽光発電電力の利用度を算定することができる。図 2.2-17 にて、橙色の帯の時間帯では太陽光発電電力が余剰となり、蓄電池あるいは商用車の電力利用に供されず、いわゆる発電抑制状態になっている。車載面の日射を評価する目的においては、この出力抑制部分を満たした、いわゆる名目太陽光発電電量で行う必要がある。

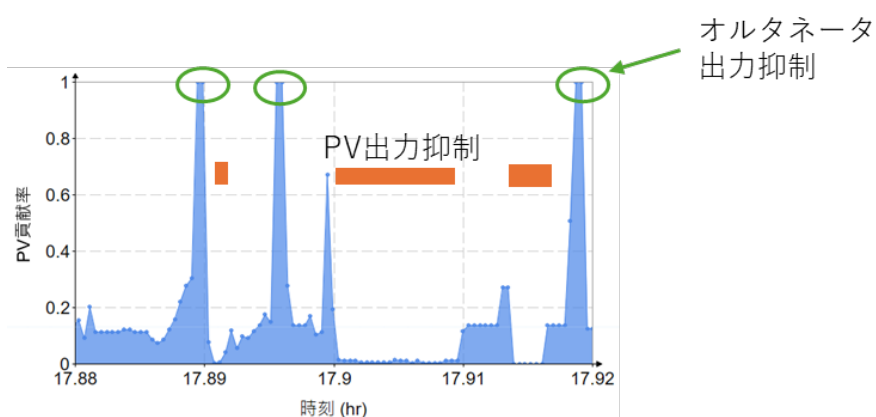


図 2.2-17 太陽光発電およびオルタネータの出力抑制の様子

名目太陽光発電電量の推定には、図 2.2-17 の橙色の帯の部分の時間積算値を求め、この期間も全区間（1 時間）での平均電力に相当した発電電量が得られていたはずである、といった仮定を当てはめる。このようにして補正した名目太陽光発電電量と実際の発電電量との関係は図 2.2-18 に示すように 45° ラインの下にややランダムに分布する傾向となる。

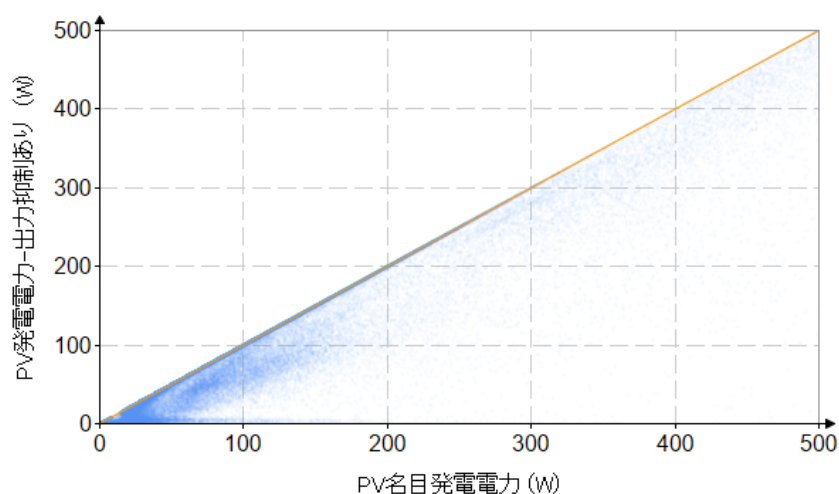


図 2.2-18 名目発電電力と実際の発電電力との関係

なお、発電電力が 0 W 付近のプロットが濃くなっているのは、商用車の多くが 24 時間稼働しており、今回も朝の 4 時から夜の 10 時まで発電データを収集したためである。

出力抑制後の名目太陽光発電電量のうち、実際にオルタネータ発電抑制や負荷への供給に使われる電力の総和、つまり燃料節約に使われるエネルギーの割合は、本報告のために集計した期間

(2024/3/8～2025/1/31) では約 88%である。この係数は冷房負荷が加わる夏期には 90%強にまで上昇するが、概ねこの比率を用いても精度上、問題ないと思われる。

以下、車載面の日射の解析に進むが、特に指定のない限り、名目太陽光発電電力を利用する。以下、太陽光発電量などと称された場合、図 2.2-18 や図 2.2-17 に示した名目発電量であることに注意されたい。

また、本事業においては一度に 200 台のトラックへ計装システムを設置したわけではなく、さまざまなトライアンドエラーを経て徐々に台数を増やしていった。図 2.2-19 に示すように、やや秋から冬にかけて重みが付いたデータとなっている。特に、3 月～6 月は朝・夕の太陽高度が低い時間帯のデータが多くなっている。車載面の日射のモデル化、あるいは季節補正（時刻による太陽高度補正）は遮蔽確率に基づく統計モデルを使うので、バイアスがかかっていないかどうかは慎重に判断する必要がある。

全国各地（北海道から沖縄）を走行するトラックに車載太陽電池を取り付け、その発電量をモニターする実証を行った。発電量に関しては、日影発生確率に応じ走行街路を①ビル・山間部、②住宅地、③郊外の 3 区分に分類し、太陽高度に応じて日影確率を与え、近隣气象台で観測されている水平面全天日射量、日照時間、気温の観測値と紐付けることにより、車載面の予想日射量を算出し、これを発電量実績と比較した。これにより、確率モデルに基づき、各地の気象状況や日影状況に応じ、車載面太陽電池が受ける日射量の値付けをおこなっている。

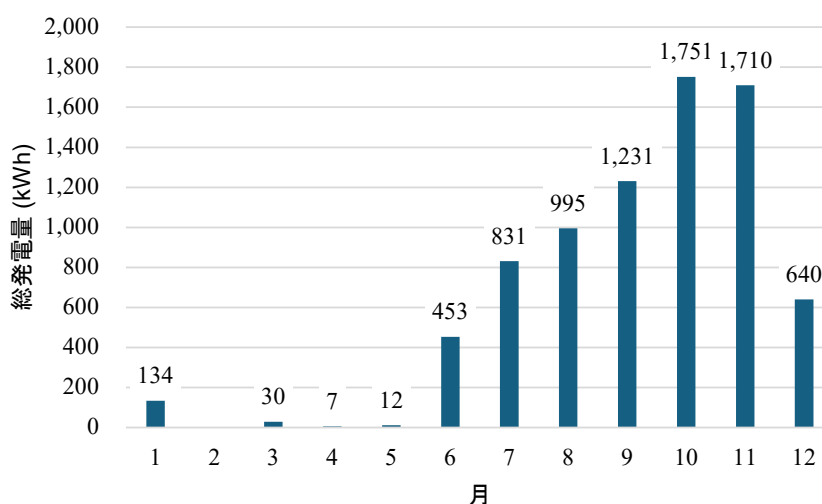


図 2.2-19 商用車搭載太陽光発電の発電量実績

発電量と車載面の日射を遮蔽確率から算出した日射予測値に基づく発電量予測値との相関を図 2.2-20 に示す。なお、車載面の日射は水平面全天日射量に周辺構造物による天空遮蔽率を作用させた散乱日射量と、遮蔽率の期待値から算出した直達日射の和から算出したが、基準となる水平面全天日射および直達日射の期待値の算出に用いる日照率については、近隣气象台の観測結果を用いた。それぞれの商用車に紐付けた气象台は、走行区間の緯度・経度のメジアン値から距離が最短となる气象台を探索することにより求めた。また、水平面全天日射量、日照率とも、11 時～12 時の間に計測したデータを 12 時のデータとしているので、例えば、商用車の代表時刻が 11 時 15 分の場合、11 時の計測値の 0.25 倍と 10 時の計測値の 0.75 倍を加えることにより算出した。実

際のトラックの位置と日射量を計測している管区气象台とは数十 km 距離が離れていることが多く、必ずしもその地点の天候を示しているわけではない。しかしながら、長期にわたりデータを取得することにより、ランダムな誤差は平滑化されるため、それほど大きな誤差とはならないと推定した。

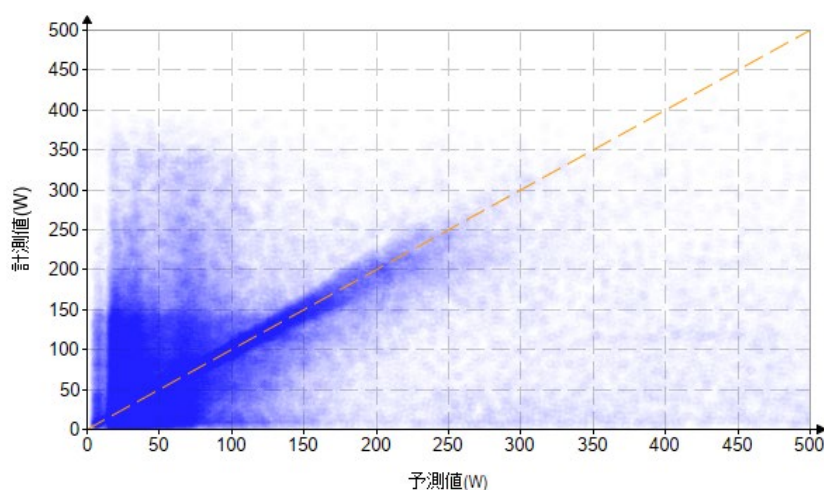


図 2.2-20 日射量予測値と日射量計測値との相関

この推定を適用するには、日射計算に影響を及ぼすさまざまな要因に対して、バイアスがかかっていないことを確認するのが肝要である。たとえば、太陽光の遮蔽に影響を与える太陽高度と遮蔽率分布に関しては、緯度に対して予測誤差の分布に偏りが無いことで確認できる。結果を図 2.2-21 に示す。沖縄（発電量過小）と九州中央部（発電量過大）での走行でやや偏りはあるものの、概ねバイアスがない結果が得られた。

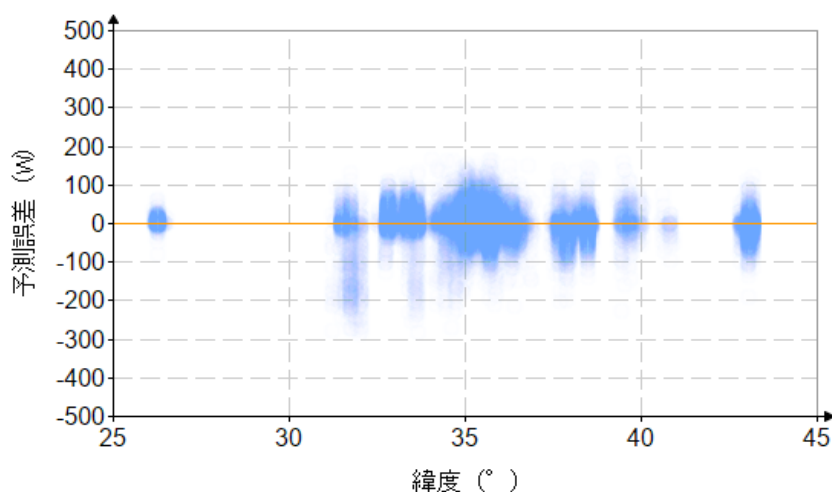


図 2.2-21 予測誤差と緯度との関係（太陽高度による偏りの有無）

天候、つまり、日射の直達光比率については、日照率と予測誤差との相関を調べることでバイアスの有無を確認できる。結果を図 2.2-22 に示す。日照率が高いほど過大に評価する傾向があるようには見えるが、それほど大きくバイアスしていないと判断できる。

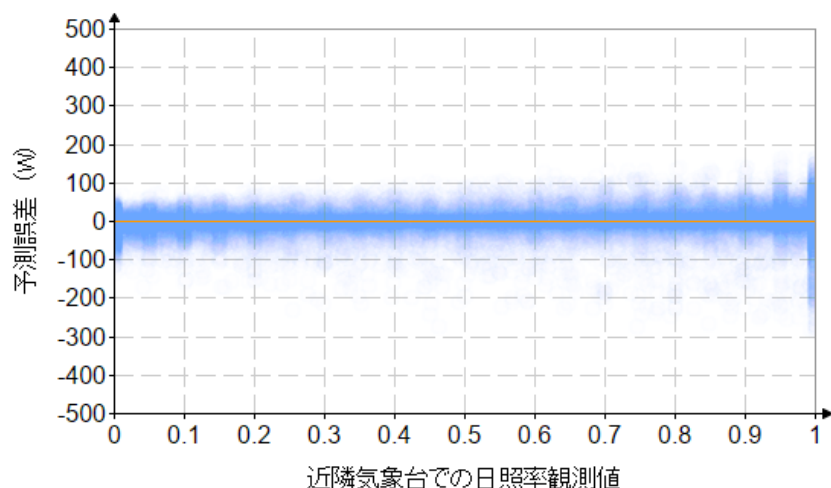


図 2.2-22 予測誤差と日照率との関係（直達日射比率による偏りの有無）

次に、車載面での日射は、通常の水平面全天日射とどのくらい異なるかを算定する。以下において、外れ値や異常値により修正比率の精度悪化を避けるため、日射計測レコードにフィルターをかける。外れ値や異常値は様々な要因で発生する。最もありうる要因は、商用車の実際の位置と管区気象台が離れていることによる日射および天候が異なることであるが、このほかにも、停車中の荷積み・荷下ろし作業を倉庫屋内で行ったり、GPS データ取得の環境が悪く、遙か遠方の管区気象台に紐付けられたり、計測器の試運転やトラブルによる異常データの混入もある。今回はパフォーマンスレシオが0.5未満あるいは2.0より大きかった場合、異常値として除外して集計を行った。

発電量を予測し、月毎に集計し、実際の発電量と比較した結果を図 2.2-23～24 に示す。

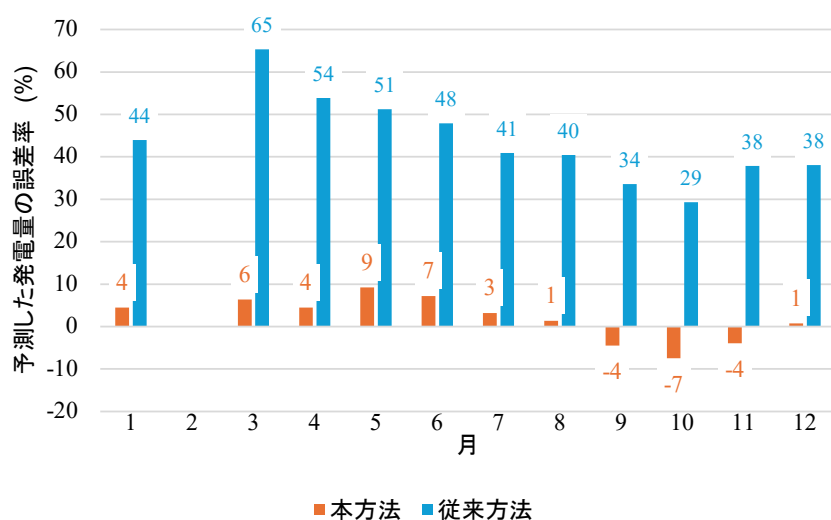


図 2.2-23 ランダムルートと日射確率モデルによる発電量予測と実測値との比較

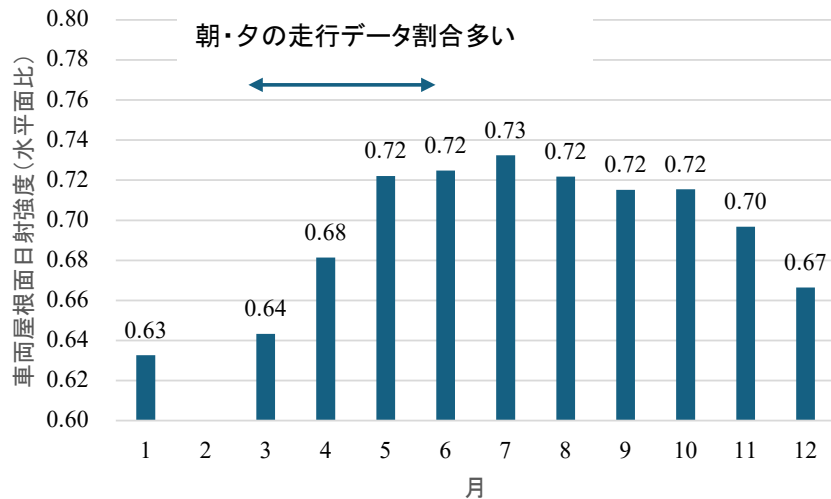


図 2.2-24 車載面日射推定値の水平面全天日射量との比較

従来の水平面全天日射で発電量を算出する手法では、周辺構造物や斜面などによる日影の影響が考慮されず、過大評価となるが、本手法では季節毎に多少の増減はあるものの、1 年を通じて過大評価が解消されている（図 2.2-23）。

月毎の日射量比率を見ると、太陽高度が高い夏では比率が高く、太陽高度が低く日影の影響を受けやすくなる冬では比率は下がる（図 2.2-24）。3 月から 6 月のデータは計測開始直後でデータサイズも小さく、朝と夕方の発電記録割合が高かったため、実質太陽高度が低くなり、比率も多少小さくなっていることに注意されたい。

なお、走行街区の割合は、①ビル・山間部：41%、②住宅地：13%、③郊外：47%である。3 月～5 月は、太陽光発電を搭載したトラックの台数が少なく、データも早朝および夕方に多少偏りがある。いずれにせよ、道路周辺の構造物による日影の影響を受け、車載面の日射量は平均して約 7 割まで低下することは念頭に置く必要がある（上記評価期間積算した車載面太陽電池の発電量実績は、従来方法で計算した発電量の 71%）。

また、月別のみならず、緯度、天候状態でも予測誤差に系統的な偏りが見られない（図 2.2-21～22）ことから、本モデルによる車載面日射量予測は、天候の違いや太陽高度（緯度や時刻、季節に依存）にかかわらず、日本全国汎用的に使うことができる。

なお、国際規格 IEC61853-4 で規定される Temperate Coastal 気候区での標準日射データベースで、同じく国際規格で議論されている Moderate Shading Zone (低層ビルおよび住宅地域)で算出した車載面日射量の水平面日射量比は 0.671 であり、本調査での経路が日影確率の低い郊外経路の割合が高かったことを勘案すると、ほぼ同じ日射割合となっている。なお、各日影環境 zone で重み付けすると、Lightly shaded zone (郊外)、Heavy shaded zone (高層ビルまたは山間地)での日射割合はそれぞれ 0.455、0.904 であるため、 $0.455 \times 0.41 + 0.671 \times 0.13 + 0.904 \times 0.47 = 0.699$ となり、本事業における発電量比率 0.71 とかなり近くなる。山間部を走行するか、郊外を走行のかなど、走行モードにより低下割合は変化するが、共通の車載面日射量モデル・発電量モデルで算出できる。ただし、乗用車のように車体面が曲面の場合は、これに加え曲面固有の損失（部分日影や自己影を含む）が加わることになる。

(3) 太陽光発電による燃料削減効果の推定

以上の発電量検証結果から、燃料削減効果を推定する。

一部のトラックにおいて、太陽光発電量をモニターするとともに、燃料噴射量を別のロガーシステムでモニタリングした。両者のクロック（GPS 時計）で一致した時間帯を探索することにより、発電データ（オルタネータ動作抑制量）と燃料噴射量を同期させた。トラックの燃料噴射量はさまざまな要因で大きく変動するが、アイドリングまたは低速走行状態では運転の癖や路面の状況による影響を受けにくく、オルタネータ発電量と燃料噴射量との相関関係を見いだしやすくなる。例として、大型保冷トラックがアイドリング動作していた時間帯でのオルタネータ発電電力量と燃料噴射量との関係を図 2.2-25 に示す。回帰線の傾きが、この動作条件におけるオルタネータ単位発電電力量当たりの燃料消費量に対応する。アイドリング時は、小さい負荷で大型ディーゼルエンジンを回さなければならないので、燃料消費量も相対的に高くなる。

燃料削減効果として 10 月下旬よりモニタリングを開始した全国規模の輸送網を有する運輸業の 7 台のトラックの走行実績から燃料削減効果を算定した例を図 2.2-26 に示す。11 月に限定した計測結果であるが、北海道から九州まで走行実績は一樣にカバーされており、代表例として妥当であろうと考える。燃料削減効果はアイドリングでのオルタネータ動作抑制が主であり、1 ヶ月当たりの軽油削減量は 62 リットル/台月と算定された。これはトラック 1 台月あたり 162 kg の温室効果ガス排出削減効果があったことになる。燃費に換算すれば、5%改善したと算定される。

本ケースでは太陽高度が低い 11 月の発電量実績から算定した燃料削減効果として 5%と算出したが、季節変動を考慮すれば、太陽光発電量および燃料削減効果は約 1.6 倍、つまり 8%の燃料削減効果が期待できる。

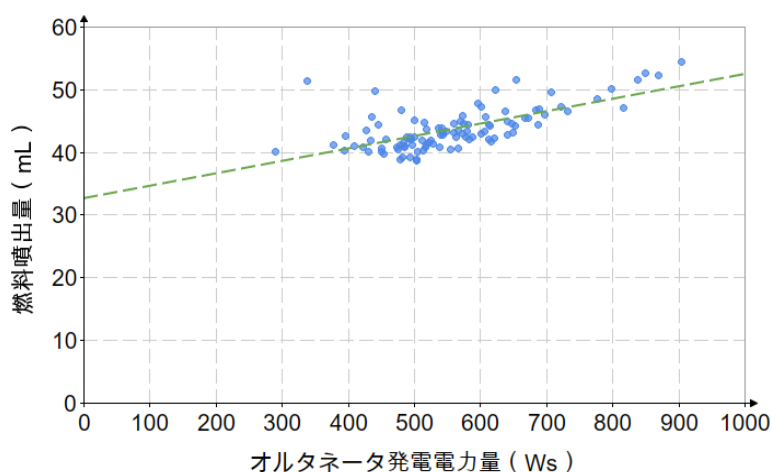


図 2.2-25 オルタネータ電力量と燃料噴射量との関係計測例

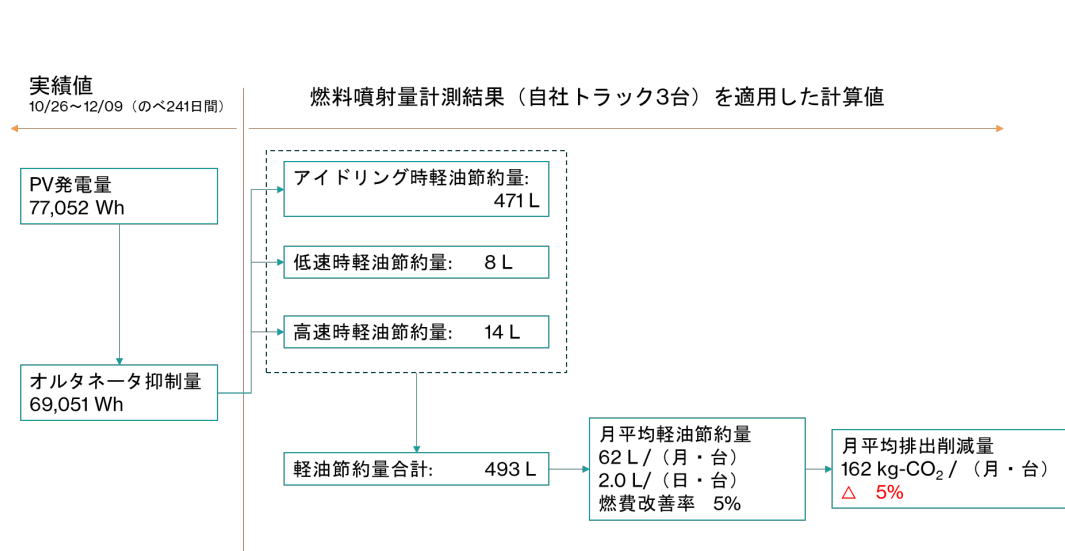


図 2.2-26 全国規模の輸送会社が保有する 7 台のトラックでの 11 月での燃料節約効果算定結果

2.3 乗用車搭載用太陽電池モジュールの信頼性評価

2.3.1 環境負荷試験項目の整理および留意点

車載太陽電池は、建物屋根や地上などに定置される従来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および試験条件の違いを明確にした²⁰。

車載太陽電池は、地上用太陽電池の派生品であるとも考えられ、且つ、自動車部品（電気電子機器、ガラス）であるため、これらの使用環境を想定した信頼性評価試験の国内外の規格（ISO、IEC、JIS、JASO）を調査した。調査結果を以下に記すが、詳細については各規格文書を参照頂きたい。

地上用太陽電池の環境負荷試験規格

- **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
- **IEC 62938:2020**, Photovoltaic (PV) modules – Non-uniform snow load testing
- **IEC TS 63397:2022**, Photovoltaic (PV) modules – Qualifying guidelines for increased hail resistance
- **IEC 62759-1 ED2:2022**, Photovoltaic (PV) modules – Transportation testing – Part 1: Transportation and shipping of module package units
- **IEC TS 63126:2020**, Guidelines for qualifying PV modules, components and materials for operation at high temperatures

自動車部品の環境負荷試験規格

- **ISO 16750-2~5:2023**, Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 2: Electrical loads, Part 3: Mechanical loads, Part 4: Climatic loads, Part 5: Chemical loads
- **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

表 2.3-1 に地上用太陽電池および自動車部品の環境負荷試験項目を機械負荷、気候負荷、電気負荷、化学負荷に分類して示す。ここでは、基本性能の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で規定されているもの、自動車部品のみで規定されているもの、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。

自動車部品のみで規定されている試験には機械的衝撃（高速での縁石乗り上げやドアの開閉による機械負荷）、熱衝撃があり、負荷が短時間に大きく変化することが特徴である。「地上用太陽電池のみ」および「地上用太陽電池と自動車部品の両方」で規定されている試験（降雹、一定温度、ダンブヒート、温度サイクル、塩水・アンモニア噴霧など）は車載太陽電池においても一通り実施が必要と思われる。このうち、降雹については被害が増加傾向にあり、評価と耐久性が求められている。以下では、これらの試験に着目して特徴を解説する。

JASO D902 で規定されている熱衝撃試験では、供試体の温度を -40°C と 85°C の間で $25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の速度で変化させるとしており、これは地上用太陽電池の温度サイクル試験（IEC 61730-2 MST 51, IEC61215-2 MQT 11）より約 15 倍大きい（図 2.3-2 参照）。太陽電池（PV）モジュールは比較的に薄い構造体であるため、厚さ方向に温度差が生じにくい、環境温度の変化が急峻な場合と緩慢な場合とでは異なる熱応力がモジュールの構成材料に作用し得るため、試験による検証が必要だと考えられる。

振動試験は、地上用太陽電池と自動車部品の両方で規定されているが、地上用太陽電池（IEC 62759-1 ED2）では輸送時の負荷を想定しており、振動の周波数範囲が $1\sim 200\text{ Hz}$ である。一方、車載用電気・電子機器（ISO 16750-3、JASO D 014-3、JASO D 902）では、搭載部位と車種に応じたランダム振動試験、機械的衝撃試験の条件が細かく定められている。乗用車のボディ上に搭載する機器では振動の周波数範囲が $1\sim 2000\text{ Hz}$ であり、地上用太陽電池とは大きく異なる。なお、車載用電気・電子機器の環境試験規格 ISO 16750 では、2023 年に内燃機関（ICE）自動車、ハイブリッド自動車（HEV）、電気自動車（BEV）の試験が統合され、条件が更新されている。ICE 車と HEV/BEV（乗用車）の試験条件を比較すると、振動試験では最大周波数が 1000 Hz （ICE）と 2000 Hz （HEV/BEV）であり HEV/BEV の条件は ICE 車よりも厳しい。また、機械的衝撃試験では、搭載部位によらず ICE 車の衝撃回数が約 2 倍に増加し、HEV/BEV 車の衝撃回数と統一されている。

降雹試験は、地上用太陽電池では IEC61215-2 MQT17 に規定されており、発射装置から氷球を射出してモジュールに衝突させる。このための特殊な設備が必要となる。過去の JIS C 8917 では簡易試験方法として鋼球をモジュールに落下させる試験が示されている。この方法は自動車用安全ガラス試験（JIS R 3212 5.4 耐衝撃性試験）に準じており、これと同じ寸法と重量の鋼球を使用する。JIS R 3212 の試験は安全ガラスが小さな硬い飛来物の衝撃に対して最低限必要な粘着性又は強度を有しているかを調べることを目的としており、鋼球の落下高さは JIS C 8917 で規定されている 1 m よりも高い。

上記のような試験は自動車に特有の環境負荷を想定したものであるため、車載太陽電池においても試験を実施することが望まれる。しかし、PV モジュールに対するこれらの環境負荷試験の報告例はほとんどない。次節では、PV モジュールに対して車載用電気・電子機器の振動試験、機械的衝撃試験、熱衝撃試験および地上用太陽電池の降雹（鋼球落下）試験を実施した結果を一例として紹介する。車載太陽電池では、軽量性や曲面追従性の観点から、ガラスの代わりに樹脂材料を使用したモジュール構造（樹脂モジュール）も候補となるため、ここでは樹脂モジュールを主な対象として試験を実施した。

表 2.3-1 車載太陽電池に関連する環境負荷試験

負荷 種別	評価項目	地上用太陽電池								自動車部品					
		IEC (JIS C) 61730-2	IEC (JIS C) 61215-2	IEC 61701	IEC 62716	IEC 62938	IEC TS 63397	IEC 62759- 1 ED2	IEC TS 63126	-2	-3	-4	-5	JASO D 902	JIS R 3212
機械	表面強度	MST 12									4.4				
	降雹／銅球落下		MQT 17				○								5.4
	静的荷重	MST 34	MQT 16			○ (雪)									
	振動							6.3 (輸送)			4.1			6.4	
	機械的衝撃										4.2				
	砂利衝撃										4.5				
気候	一定温度	MST 37, 55, 56							○			5.1			5.8 5.19
	高温高湿定常 (ダンブヒート)	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 5.8			
	耐日射 (UV)	MST 54	MQT 10									5.10			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／氷水											5.3.2 5.4		6.2	
	混合ガス流腐食											5.9			
電気	粉塵											5.11			
	大気圧											5.12			
	ホットスポット耐久	MST 22	MQT 09												
電気	電磁両立性 (EMC)									4.13					
化学													○		5.15

(緑：地上用太陽電池のみで規定、赤：自動車部品のみに規定、青：自動車部品と地上用太陽電池の両方で規定)

2.3.2 自動車部品向け信頼性試験の実施

(1) 振動試験および機械的衝撃試験

モジュールのトップ層に樹脂（ポリカーボネート：以下 PC）を用いた樹脂モジュールを製作した。樹脂モジュールは、モジュール表面から順に、PC／封止材／結晶 Si [c-Si]セル（2×2アレイ）／封止材／バックシートで構成される。ここでは c-Si セルとして、3 本バスバー（幅：2.0 mm）の PERC セル（寸法：156×156×0.2t mm [電極の厚さを含む]）を使用した。また、セル間をリボン線（幅：2.0 mm、銅線厚さ：0.15 mm、メッキ厚：40 μm）でインターコネクトし、リボン線同士をタブ線（幅：6.0 mm、銅線厚さ：0.23 mm、メッキ厚：40 μm）で結合して全てのセルを直列接続した。比較のため、トップ層にガラスを用いた一般的な層構成のガラスモジュールも製作した。図 2.3-1（左）に試験装置およびモジュールの外観を示す。モジュールの全周をアルミ合金製の枠で挟み、加振台に固定した。図 2.3-1（中）にランダム振動試験（JASO D 014-3: 2014）の加速度パワースペクトル密度（PSD） vs 周波数を示す。この振動を X,Y,Z 軸方向に 8 時間ずつ加振した。図 2.3-1（右）に機械的衝撃試験（JASO D 014-3: 2014）の加速度 vs 時間を示す。この加速度を各軸方向（正と負の方向）に各 10 回ずつ与えた。サンプル数は各 3 個とした。

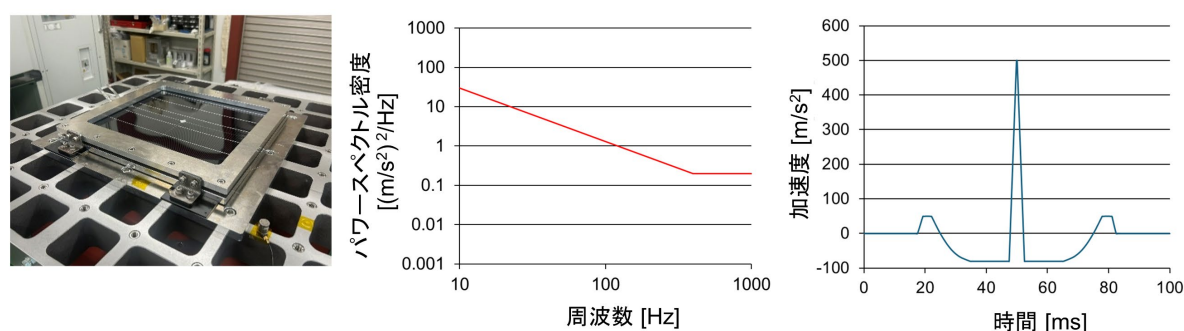


図 2.3-1 振動・機械的衝撃試験:装置外観（左）、振動試験条件（中）、機械的衝撃試験条件（右）

表 2.3-2 および表 2.3-3 に標準試験条件（STC）における試験前後のモジュール最大出力 $P_{\max}$ の劣化率を示す。ランダム振動試験（表 2.3-2）ではガラスモジュール Glass-1～Glass-3 の平均劣化率が-1.0%であるのに対し、樹脂モジュール PC-1～PC-3 では-3.2%となり、有意な差が見られた。機械的衝撃試験（表 2.3-3）ではガラスモジュールの平均劣化率が-0.47%であるのに対し、樹脂モジュールでは-3.5%となり、ランダム振動試験と同様に有意な差が見られた。主に短絡電流の低下が $P_{\max}$ の劣化の原因となっており、開放電圧や F.F.の変化は小さかった。樹脂モジュールはガラスモジュールよりも振動時および衝撃時の振幅が大きく、固有振動数が小さい。この材料特性が劣化の要因になっている可能性が高く、樹脂ベースのモジュールを車載太陽電池に使う場合は注意が必要である。

表 2.3-2 ランダム振動試験結果

被試験 モジュール	$P_{\max}$ 劣化率 [%]	平均劣化率 [%]
PC-1	-2.7	
PC-2	-2.5	-3.2
PC-3	-4.3	
Glass-1	-1.3	
Glass-2	-0.8	-1.0
Glass-3	-0.9	

表 2.3-3 機械的衝撃試験結果

被試験 モジュール	$P_{\max}$ 劣化率 [%]	平均劣化率 [%]
PC-1	-3.1	
PC-2	-3.5	-3.5
PC-3	-4.0	
Glass-1	-0.5	
Glass-2	-0.4	-0.47
Glass-3	-0.5	

(2) 熱衝撃試験

モジュールのトップ層／ボトム層が、ガラス／バックシート、PC／バックシート、PC／PC である 3 種類のモジュール（2×2 セルアレイ）を試験した。使用したセルおよび電気接続の構成は、「(1) 振動試験および機械的衝撃試験」と同じである。図 2.3-2 に車載電子部品用の熱衝撃試験（JASO D 902:2012）の槽内温度の変化を示す。比較のために通常の PV モジュールに対する温度サイクル試験（IEC 61215-2:2016）の槽内温度の変化も併せて示す。熱衝撃試験では槽内温度が 5 分間以内に-40℃から 85℃まで（あるいはその逆に）変化し、急峻な温度変化が試験体に与えられる。

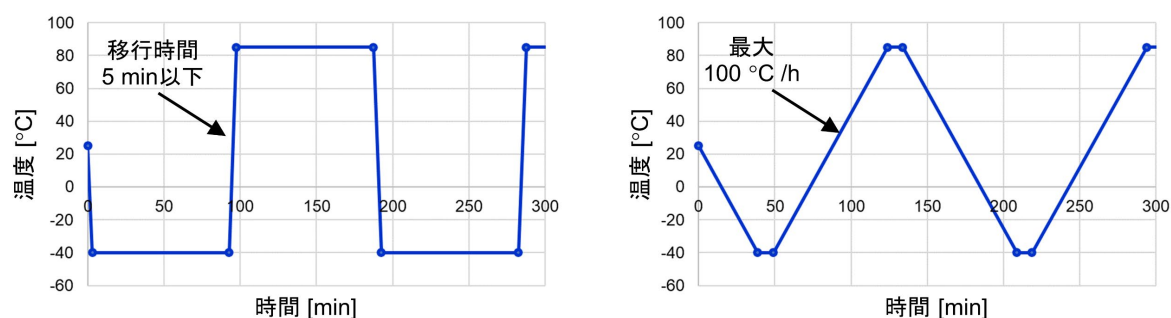


図 2.3-2 JASO D 902 熱衝撃試験（左）、IEC 61215-2 温度サイクル試験（右）の温度変化比較

図 2.3-3 に各モジュールの試験前後の外観、EL 画像、 $P_{\max}$ 劣化率を示す。PC／バックシートおよび PC／PC に顕著な劣化がみられ、PC／バックシートでは 3 個のサンプルのうち 2 個が試験後の IV、EL 測定ができなかった。PC／PC ではすべてのサンプルが試験後の IV、EL 測定ができなかった。これらの樹脂モジュールでは、セル間を結ぶ細いリボン線、細いリボン線が合流する太いリボン線が変形によって断線していた。一方、ガラスモジュールでは外観および EL 画像に明確な劣化がなく、 $P_{\max}$ の劣化率は 1%未満であった。PC はガラスに比べて熱膨張係数が大きいいため、急峻な温度変化に伴う熱応力および熱変形が大きくなり、リボン線の断線が生じたものと考えられる。樹脂ベースのモジュールを車載太陽電池に使う場合は、振動／機械衝撃と同様に熱衝撃への耐久性においても注意が必要である。

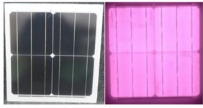
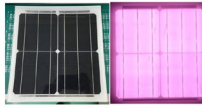
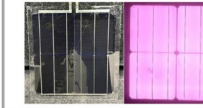
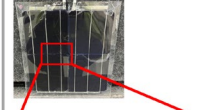
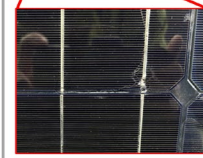
	ガラス/バックシート	PC/バックシート	PC/PC
熱衝撃 試験前			
熱衝撃 試験後	 平均 P_{max} 劣化率: -0.47% ($n = 3$)	  P_{max} 劣化率: -53.9% (2枚は断線により測定不可)	  3枚とも断線により測定不可

図 2.3-3 熱衝撃試験結果

(3) 鋼球落下試験

降雹等の小さく硬い飛来物に対する耐衝撃性評価の試験規格（JIS R 3212:2015：自動車用安全ガラス、JIS C 8917:2005：地上用太陽電池）に基づいた鋼球落下試験を実施した。ここでは、トップ層樹脂／セルの組み合わせが、ETFE／結晶 Si セルおよび ETFE-PET-EVA／CIGS セルの 2 種類のフレキシブルモジュールを試験対象とした。結晶 Si モジュールは通販サイトで入手できる安価なタイプである。後付けの車載太陽電池を簡易的に模擬するため、図 2.3-4 に示すように乗用車ルーフにモジュールを貼り付け、図中に示す高さから鋼球を各セルの中心に落下させた。結晶 Si モジュールは、9 セルからなるストリングごとに 4 種類の高さから鋼球を落下させ、CIGS モジュールは、12 枚のセルに対して 1.0 m の高さから鋼球を落下させた。鋼球は、JIS C 8917:2005 および JIS R 3212:2015 の試験で使用する質量 225 g、直径 38 mm のものを用いた。

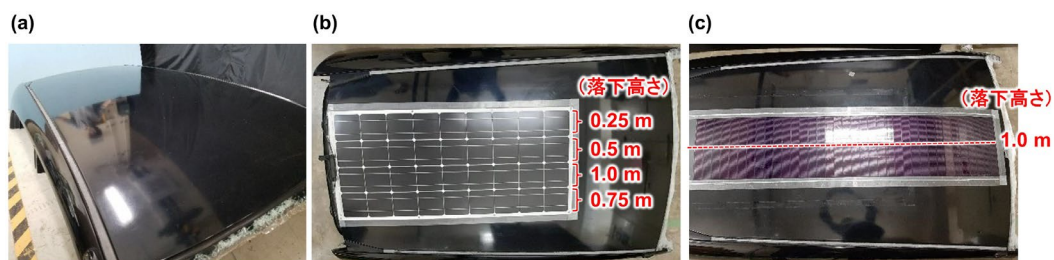


図 2.3-4 乗用車ルーフに貼り付けた試験モジュールおよび鋼球落下高さ
：(a)ルーフ外観、(b)結晶 Si モジュール、(c)CIGS モジュール

図 2.3-5 に、結晶 Si モジュールの試験前後の EL 画像および代表セルの外観写真を示す。落下高さ 0.75 m 以上では全てのセルで鋼球衝突箇所にクラックが生じ、モジュール表面に衝突痕が残った。一方、図 2.3-6 に示すように、CIGS モジュールでは高さ 1 m からの鋼球落下により表面に衝突痕が残ったものの、EL 画像からセルの著しい損傷は観察されなかった。結晶 Si モジュールおよび CIGS モジュールの厚さはそれぞれ 2.0 mm および 2.5 mm であり、樹脂およびセルの厚さや機械的特性が異なることが結果の差に繋がったものと思われる。

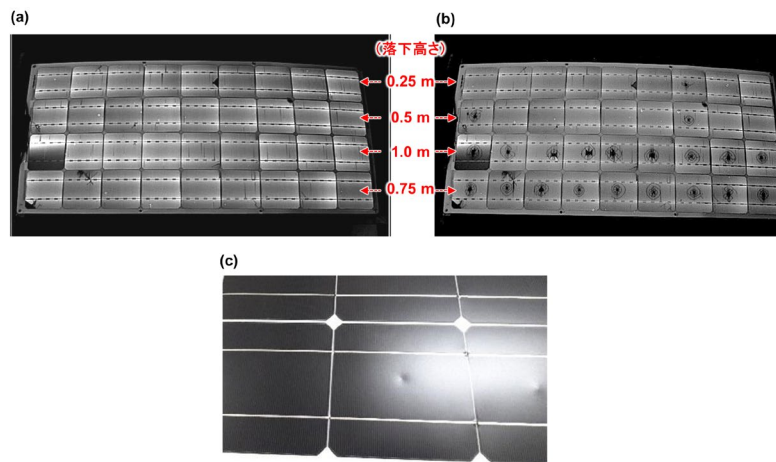


図 2.3-5 結晶 Si モジュールの鋼球落下試験結果

: (a)鋼球落下前の EL、(b)鋼球落下後の EL、(c)代表セルの外観写真

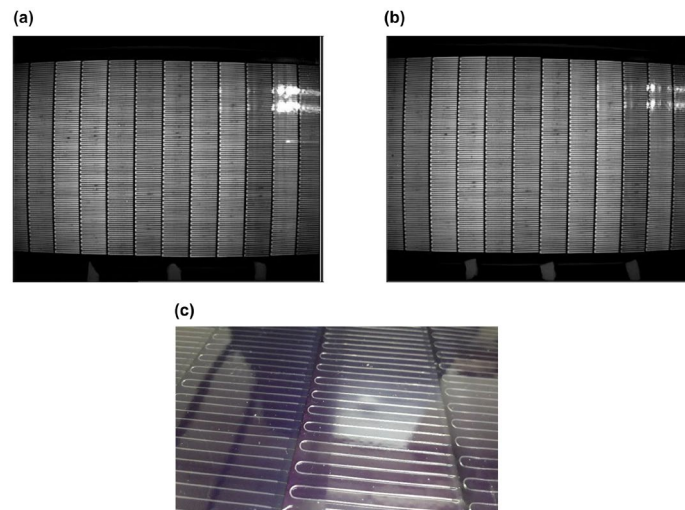


図 2.3-6 CIGS モジュールの鋼球落下試験結果

: (a)鋼球落下前の EL、(b)鋼球落下後の EL、(c)代表セルの外観写真

2.3.3 まとめ

車載太陽電池に必要と考えられる信頼性評価項目を調査・検討するとともに、太陽電池モジュールに対して車載用電気・電子機器の振動・機械的衝撃試験、熱衝撃試験、鋼球落下試験を実施した例を示した。いずれの試験においても性能劣化が見られたが、ガラスモジュールに比べて樹脂モジュールではより顕著な劣化が見られた。自動車部品に特有の環境負荷に起因する劣化挙動が、モジュールの材料や構造により大きく異なることを示しており、研究開発および製品化の過程において、これらの試験を適宜実施することが望まれる。とくに、今回の樹脂モジュールのように従来 PV モジュールとは異なる材料・構造等を採用する場合や、モジュール形状に曲面が含まれる場合には、セルおよびセル周囲に作用する応力が高くなり得るため²¹⁾、試験の必要性は高くなる。結果として、車載太陽電池の試験項目は定置型太陽電池に比べて多岐にわたるが、要求寿命は定置型より短いため、より効率的な試験方法の確立が望まれる。

2.4 車載太陽電池によるレジリエンス

電気自動車および太陽電池モジュールの利点として、被災時の非常電源としての活用が挙げられている。レジリエンス効果については自動車に車載した太陽電池（以下、車載太陽電池）の発電量から算定できる。ただし、レジリエンスの効果については、供給側（発電量）だけでなく、需要側（災害救護拠点でのエネルギー需要）、車載太陽電池で得られた余剰エネルギーを災害救護拠点へ融通・運搬する過程も等しく重要となる。とくに、エネルギー融通に関しては被災時の社会行動も大きな影響を及ぼす。

2.4.1 レジリエンスシナリオ

定量的な議論には数値モデル化が必要となる。また、このモデル化には、どのような被災状況で、何に対してアクションがなされ、どのような状況になったらレジリエンスとして効果があったと見なすか、いわゆる勝利条件の定量化が必要である。ここでは、阪神淡路大震災でのライフライン復旧の経験から、7日間（7日×24時間/日＝168時間）非常時のエネルギー需要を満たすことができることとした。

被災のタイミングは予測し難く、24時間×365日いつ発生しても不思議ではない。夏と冬、昼間と夜ではエネルギー需給も異なる。このような不確かな状況を勘案した定量モデルには確率を用いたシミュレーションが不可欠である（図 2.4-1）。また、確率モデルは、万が一に備えてレジリエンスに過大投資して、防災設備が活用されることなく陳腐化するといったリスクも定量的判断のもと、排除することができる。

エネルギー融通に関しての社会モデルでは、自発的な融通を前提とした。車載太陽電池であれば、放置しても蓄電池に電気エネルギーが蓄積されるため、公共財供与に対する心理的バリアが低くなることが期待される。なお、宮崎大学が実施した近隣学区住民へのアンケート調査ではおよそ 40%が被災時に充電された電力を防災拠点へ供与することに対し肯定的であるとの調査結果が得られている¹¹。

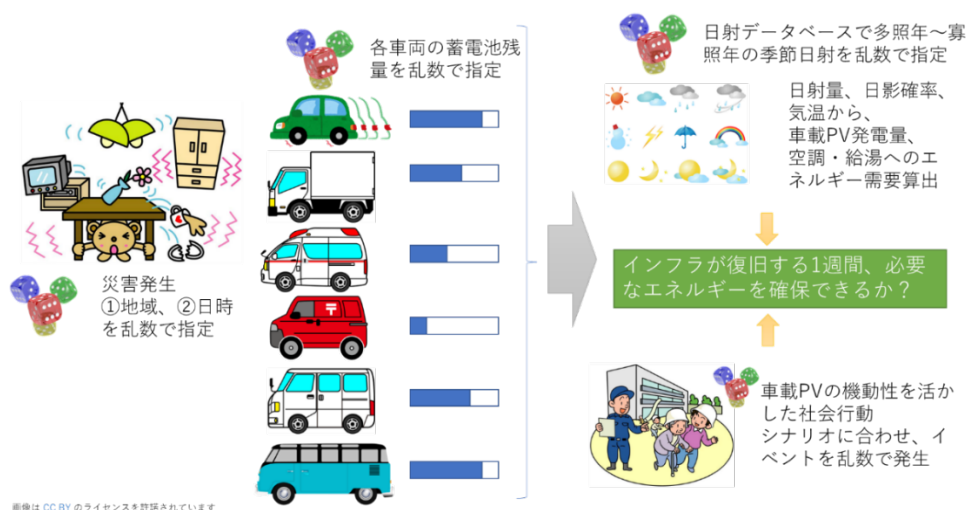


図 2.4-1 確率モデルによる被災時余剰エネルギーの活用モデル

自発的なエネルギー提供は、自治体の防災計画などで整備された防災拠点インフラ用というより、公共財としての特性を活かした使い方が好ましいと考える。したがって、図 2.4-2 のように、非常用電源などで運用されることを前提とした従来型防災インフラを補完する使い方を想定した。



図 2.4-2 自発的提供エネルギーによるレジリエンスの補完関係

表 2.4-1 にレジリエンス効果の算定に用いたパラメータを示す。

想定地区は宮崎県宮崎市の住宅地とし、太陽光発電搭載車両の台数は 200～1,600 台とした。太陽電池モジュール容量は 400 Wp とし、曲面補正を考慮したパフォーマンスレシオは 0.9、車両のエネルギー効率（電費）は 8.33 km/kWh、蓄電池容量は 40 kWh とした。太陽光発電に寄与する日射量について、道路（融雪時）や周辺遮蔽物による反射率も考慮した。電力の需要として、モバイルデバイス充電、スポット空調機、医療機能を有する臨時救護所を想定した。

表 2.4-1 計算に用いたパラメーター一覧

パラメータ	詳細説明	値
想定地区	宮崎市、住宅地	87376 (METPV インデックス)
太陽光発電搭載車台数	モンテカルロシミュレーションの初期値 (自然数)	200~1600 台
太陽電池モジュール定格効率		22%
太陽電池モジュール被覆投影面積		1.8 m ²
太陽光発電パフォーマンスレシオ	曲面補正など (温度補正は別途)	90%
温度補正係数		-0.328%/K
電力マネジメント効率		93%
MPPT 効率		95%
電費		8.33 km/kWh
蓄電池容量		40 kWh
道路の反射率	車体鉛直面への反射率	0.08
積雪時の道路の反射率	積雪>10 cm での積雪面から車体鉛直面への反射率	0.9
周辺遮蔽物の反射率	ビル壁面など	0.25
モバイルデバイス充電端末数	歩行圏内 (1 km) に配置	25
モバイルデバイス充電端末必要設備容量	24 時間 (定数値)	各々 0.2 kW
スポット空調機必要台数		6 台
スポット空調機設備容量	24 時間 (定数値)	2.2 kW (6 馬力)
医療機能を有する臨時救護所		1 ヶ所
医療機能を有する臨時救護所の電力需要	時間帯により変動	0.36 kW 00:00 - 06:00 1.61 kW 06:00 - 17:00 4.47 kW 17:00 - 21:00 0.36 kW 21:00 - 24:00
公共財提供地点までの走行距離		5 km

2.4.2 車載太陽電池によるレジリエンス拠点としての効果

下記のシナリオを想定し、車載太陽電池によるレジリエンスの有効性、およびこれが機能するための必要要件を検討した。

1. 某日某時に P 市 V 地区で災害発生（乱数で与える）
2. 最初の数時間で従来の防災インフラに加え、下記開設。
 - ・ 臨時救護所 1 箇所
 - ・ モバイル機器臨時充電所 25 箇所
 - ・ 公民館などのへの空調電力供給 6 箇所（各 4 馬力）
3. 臨時施設へ移動した電気自動車の一部が自発的に蓄電池化
4. 必要に応じて臨時施設間を移動し、電力融通
5. 地域住民が保有する太陽光発電システム搭載自動車のうち（1 時間毎更新）
 - ・ 車載蓄電池残量が 90% 以上
 - ・ 上記のうち、5% のドライバーが上記施設に電力融通
 - ・ 供給地点まで自前の電力で運転し、
 - ・ 蓄電池残量 50% になるまで電力融通
 - ・ 自前の電力で帰る

本シナリオは、車載太陽電池によってほぼ満充電の状態の自動車所有者の 5% が余剰エネルギーを供給するといった、無理強いしない自発的エネルギー提供を想定した。

一方、被災時に必ずしも全ての車両が満タンに充電されているわけではない。また、被災後に晴天が続く潤沢に日射が供給されとは限らない。車両によっては常に日影に留め置かれることもあり得る。そのため、想定地域内の全車両一台毎に被災時での充電残量、日影状況を確率モデルで与えることとし、特に各車両の充電量初期値は乱数で与えることとした。加えて、車両所有者が余剰エネルギー提供を行うか否かについても上記確率のもと、乱数で与えた。

結果を図 2.4-3 に示す。車載太陽電池により、放置しておいても電力がたまり、余剰エネルギーが発生しやすくなることにより、被災地でのバッテリー搭載車の必要台数が半分となる。

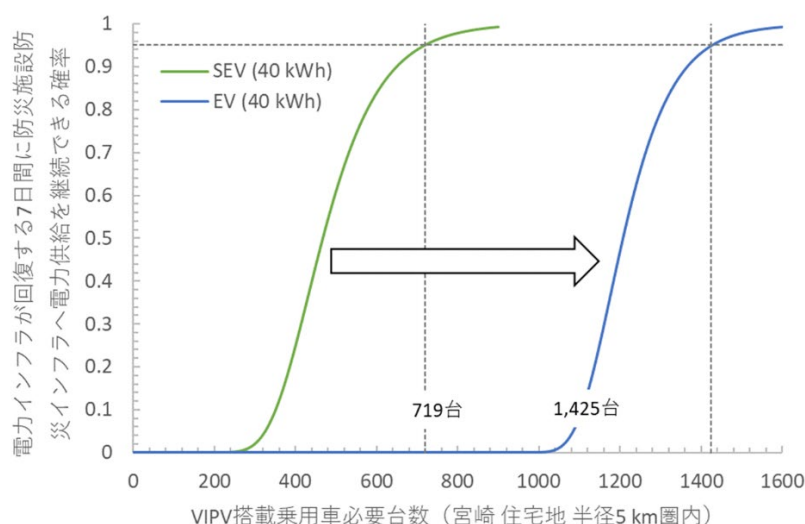


図 2.4-3 同一容量バッテリーでの太陽電池搭載車と EV の必要台数（半径 5km 圏内）

2.4.3 太陽光発電システム搭載自動車の余剰電力の融通量に応じた必要車両台数

被災時には利己的な行動により、車載太陽電池あるいは EV バッテリーに充電された電力を自家使用し、公共財へ提供することはない、といった考え、あるいは災害例もあり得る。そこで、自家使用し、それでも余った電力を供与するといった前提で、一定のレジリエンス効果を得ることを前提とし、太陽光発電システム搭載自動車の余剰電力の融通量に応じた必要車両台数を検討した。

結果例を図 2.4-4 に示す。縦軸、横軸の定義は図 2.4-3 と同一である。例えば、70-20%とはバッテリーの余剰電力が 70%以上なら 1%の確率で残量が 20%となるまで電力を供給することを指す。

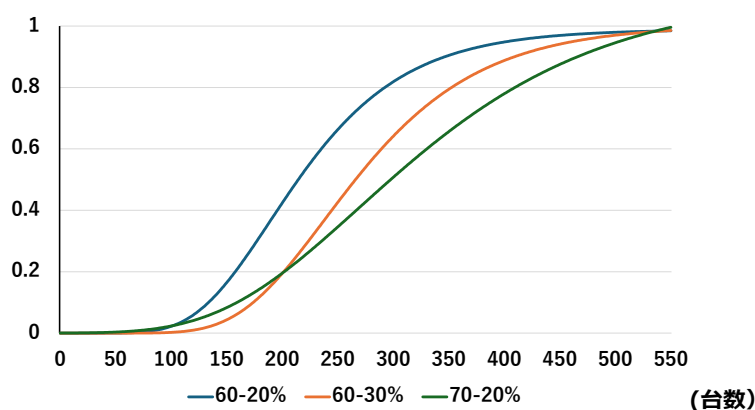


図 2.4-4 車載太陽電池での余剰電力を優先して自家使用した場合の EV の必要台数

このように、自家消費を行う上に、利己的判断で提供確率が下がった場合、公共財への提供機会が下がるため、図 2.4-3 と比べて、EV 台数が増えても災害拠点の必要電力をライフラインが復旧するまで維持できる確率はなかなか上がらない。パラメータをいろいろ変えてみて数値実験した結果、太陽光発電システム搭載自動車 1 台あたりの電力融通量を増加させることが有効ということである。つまり、60%-30%ではなく、蓄電池残量が 20%になるまで融通、あるいは、70%-20%ではなく、蓄電池残量が 60%であっても融通という行動に導くインセンティブを付与することが効果的である。

2.4.4 まとめ

電気自動車に太陽光発電を搭載することにより、非搭載の場合と比較してレジリエンス効果を高めることができる。

しかしながら、このような効果を引き出すため、公共財を前提とした政策にはインセンティブ設計が重要である。特に、利己的判断等により、余剰電力の提供確立が低下した場合には、提供者に対して十分なインセンティブを供与する制度設計が重要である。

【第2章 参考文献】

- ¹ IEA : World Energy Outlook 2002 (2022)
- ² 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", 49th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2022.
- ³ Araki, K.; Ota, Y.; Yamaguchi, M. Measurement and Modeling of 3D Solar Irradiance for Vehicle-Integrated Photovoltaic. Appl. Sci. 2020, 10, 872. <https://doi.org/10.3390/app10030872>
- ⁴ Ekins-Daukes, N., et al. "The Potential for Vehicle Integrated Photovoltaics." Proceedings of the Asia Pacific Solar Research Conference. 2020.
- ⁵ Wetzels, G., Salomon, L., Krügener, J., Bredemeier, D., & Peibst, R. (2022). High time resolution measurement of solar irradiance onto driving car body for vehicle integrated photovoltaics. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 30(5), 543-551. <https://doi.org/10.1002/pip.3526>
- ⁶ Sovetkin, E., Noll, J., Patel, N., Gerber, A., & Pieters, B. E. (2023). Vehicle-Integrated Photovoltaics Irradiation Modeling Using Aerial-Based LIDAR Data and Validation with Trip Measurements. Solar RRL, 7(8), 2200593. <https://doi.org/10.1002/solr.202200593>
- ⁷ Ota, Y., Masuda, T., Araki, K., & Yamaguchi, M. (2019). A mobile multipyranometer array for the assessment of solar irradiance incident on a photovoltaic-powered vehicle. Solar Energy, 184, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.084>
- ⁸ Macías, J., Herrero, R., San José, L., Núñez, R., & Antón, I. (2024). On the validation of a modelling tool for Vehicle Integrated PhotoVoltaics: Reflected irradiance in urban environments. Solar Energy Materials and Solar Cells, 277, 113060. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113060>
- ⁹ <https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/PV/ja/results/2020/poster/Mizuno-1.pdf>
- ¹⁰ Araki, K.; Ota, Y.; Nagaoka, A.; Nishioka, K. 3D Solar Irradiance Model for Non-Uniform Shading Environments Using Shading (Aperture) Matrix Enhanced by Local Coordinate System. Energies 2023, 16, 4414. <https://doi.org/10.3390/en16114414>
- ¹¹ Araki, K.; Ota, Y.; Maeda, A.; Kumano, M.; Nishioka, K. Solar Electric Vehicles as Energy Sources in Disaster Zones: Physical and Social Factors. Energies 2023, 16, 3580. <https://doi.org/10.3390/en16083580>
- ¹² 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)
- ¹³ 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
- ¹⁴ 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>)
- ¹⁵ 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>)
- ¹⁶ 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
- ¹⁷ SolarMoves brochure (<https://publications.tno.nl/publication/34642389/SKwCWv/tno-2024-solarmoves.pdf>) (2025年1月9日確認)

¹⁸ ASOM Press release : Press Release: IM Efficiency receives € 2,651 million subsidy from Dutch government (<https://asom.solar/im-efficiency-receives-e-2651-million-subsidy-from-dutch-government/>) (2025 年 1 月 9 日 確認)

¹⁹ U.S.DOE, SETO : Silicon Solar Manufacturing and Dual-use Photovoltaics Incubator Funding Program (<https://www.energy.gov/eere/solar/silicon-solar-manufacturing-and-dual-use-photovoltaics-incubator-funding-program>) (2025 年 1 月 9 日 確認)

²⁰ Daisuke Sato, Hayato Kobayashi, Kenji Araki, Makoto Tanaka, Noboru Yamada, Assessment of PV module reliability against automobile-specific environment for design and standardization of vehicle-integrated PV, 33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference, 2022.11.17, Paper No. ThO-22c-03.

²¹ Daisuke Sato, Hayato Kobayashi, Taizo Masuda, Kenji Araki, Yukio Miyashita, Noboru Yamada, Structural design and demonstration of three-dimensional curved photovoltaic modules using crystalline silicon solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells 279, 113258, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113258>.

第3章 まとめ（得られた知見と今後の課題・展望）

太陽光発電システム搭載自動車への取り組みは国内外で活発化してきている。

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し、普及により期待される効果を試算するとともに、太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向け、NEDO が中心となり実施している事業について、一部ではあるが、成果の概略を示した。

以下に、前章までに示された知見を総括するとともに、今後の課題と展望を示す。

3.1 得られた知見

3.1.1 太陽光発電システム搭載自動車を巡る動向と期待される効果

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、太陽電池出力の増強に加え、搭載される車両の範囲が広がり、具体的な効果に対する関心や期待も高まってきている。

- ・ 定格出力 200 W 程度の太陽光発電を搭載した乗用車は市場化されており、小型車両や商用車、トラック・トレーラー等の大型車両へと広がりを見せ始めている。大型車両への太陽光発電搭載は、日米欧で実証事業が開始されており、近い将来の市場化が期待される。
- ・ 乗用車への太陽光発電搭載はやや踊り場の感もあるが、出力 1 kW 規模の太陽光発電搭載自動車の市場化に向けた取組が継続されている。
- ・ 日本における太陽光発電システム搭載自動車（乗用車：電気自動車およびプラグインハイブリッド自動車）による効果として、普及が促進されるケースにおいて、2050 年における普及台数は 3,000 万台を上回り、2040 年代に 50 万トン/年を上回る CO₂ 排出削減が期待される。
- ・ また、2050 年において 17 TWh 相当の外部からの充電電力削減効果が期待され、これにより、外部からの充電頻度が延べ 1 億回程度削減され、ユーザーにとっての利便性や充電インフラ整備等の社会コストの低減に寄与することができる。

3.1.2 太陽光発電システムを搭載した乗用車の実証走行

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。太陽光発電システムを搭載した乗用車の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）（発電電力量と走行可能距離、曲面を有する車載面の日射量・発電量の評価）

- ・ 主に名古屋市で実施した、高速道路を中心に午前・午後にそれぞれ 35 km 走行する実証走行において、車両走行電力消費率は約 10.1 km/kWh と計測された。午前走行時の消費電力が補われ、日中駐車時に車載太陽電池による充電が行われるが、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、この電力により 30 km/日の走行が可能であることが確認された。
- ・ 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、2021 年 9 月の計測において、その定数は $5.9 \text{ km}/(\text{kWh}/\text{m}^2/\text{日})$ であった。季節による電力消費率の変化を考慮する必要があるが、例えば、東京の年間日射量は約 $1,200 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{年}$ 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 $7,080 \text{ km}$ の走行が可能ということになる。

- ・ また、静岡県南東部（沿海部～山間部）における実証走行による取得データから、走行環境による日射遮蔽（影）に加えて考慮すべき車体曲面による発電電力補正係数を分析し、エンジンフード： $0.952\sim0.971$ 、ルーフ前方： $0.968\sim0.975$ 、ルーフ後方： $0.965\sim0.968$ 、リア： $0.966\sim0.971$ となった。

(2) 電気自動車（太陽電池出力： $1,150 \text{ W}$ ）（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）

- ・ 公道走行による電力消費率実績（ $6 \text{ km}/\text{kWh}$ 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 $7,100 \text{ km}$ 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。
- ・ 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、太陽光発電により充電不要となる運用を達成できるのは走行距離が 50 km までである。
- ・ 休日のみの利用（ $25\sim200 \text{ km}/\text{日}$ の走行を想定）では、太陽光発電が平日に発電した電力を全て蓄電しておくことができないため、結果として十分に活用できていないが、平日と休日に $5\sim100 \text{ km}/\text{日}$ 走行するパターンでは、太陽光発電電力を十分に活用することが可能で、走行距離 $50 \text{ km}/\text{日}$ 以上であっても、大幅に年間充電回数を削減することが可能となる。平日の通勤利用では、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 48% 程度低減可能であることが示された。
- ・ 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 $20\sim35 \text{ V}$ にすることで、MPPT 達成率を 97% 以上にすることが可能となる。

3.1.3 太陽光発電システムを搭載した商用車の実証走行

商用車には様々な車種、用途があり、車両形態や車両の運用形態に加え、発電電力の使用形態も多岐にわたり、これらは発電性能に大きく影響し、太陽光発電搭載の効果も大きく変動すると考えられる。これらの影響を考慮した発電量の推定や太陽光発電を搭載した移動体の市場投入効果の推定にむけた取り組みが実施されている。

(1) 電動商用車（太陽光発電搭載による実証走行と設計技術の開発）

- ・ 電動商用車に太陽電池モジュールあるいは日射計を搭載し、実走行時の発電量や日射量、車両の電力消費量を計測し、太陽光発電搭載効果を検証するためのデータを取得している。

- ・ 福島県内事業者の協力により実施した実証実験においては、小型商品配送車（平均走行距離：15 km/日、屋根面積約 2.7 m²）、商品配送トラック（平均走行距離：30 km/日、屋根面積約 10 m²）にそれぞれ効率 20%の太陽電池モジュールの搭載を想定すると、小型商品配送車では車両の年間電力消費量の 44%、商品配送トラックでは 35%を太陽光発電から供給することが可能と推測され、定格 1.12 kW の太陽電池モジュールを搭載したコミュニティバス（平均走行距離：50 km/日）では、太陽光発電により、年間電力消費量の 13.5%を供給することが可能と推測された。
- ・ 並行して、車両が消費する電力消費量、蓄電池充放電量のシミュレーションモデルを開発している。太陽光発電電力量推定と融合することで、車両蓄電池の SOC シミュレーションを行うことが可能となり、太陽光発電搭載効果の推定や、蓄電池搭載量・充電制御機構設計等へのフィードバックが可能となる。

(2) 内燃機関走行トラック・トレーラー（太陽光発電搭載による効果の定量評価技術の開発）

- ・ 全国を走行する商用車（2024 年 12 月 18 日時点で 200 台）に太陽光発電（フィルム型 CIGS 太陽電池モジュール：300 W あるいは 500 W）を搭載し、発電量を常時モニターすることにより、経路に偏らない車載太陽光発電のポテンシャルを把握するとともに、これまで研究開発されてきた車載太陽光発電の発電量予測技術の実証を行っている。
- ・ 車両の日射量は、山間部を走行するか、郊外を走行のかなど、走行モードにより定置と比較して低下するが、共通の車載面日射量モデル・発電量モデルで算出することが可能である。
- ・ 7 台のトラックの走行実績から燃料削減効果を算定したところ、11 月に限定した計測結果であるが、燃料削減効果はアイドリングでのオルタネータ動作抑制が主で、燃費に換算して 5%改善したと算定される。季節変動を考慮すれば、太陽光発電量および燃料削減効果は約 1.6 倍、つまり 8%の燃料削減効果が期待できる。

3.1.4 乗用車搭載用太陽電池モジュールの信頼性評価

自動車に搭載される太陽電池は建物屋根や地上などに定置される従来の太陽電池とは異なる使用環境に晒される。そこで、車載太陽電池に必要なと考えられる信頼性評価項目を調査・検討するとともに、自動車部品向け信頼性試験が実施されている。

- ・ 一般的な地上用太陽電池と自動車部品の規格における評価項目を見ると耐久性や信頼性に対する要求が異なり、例えば、自動車部品のみで規定されている試験には機械的衝撃、熱衝撃があり、振動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が、車載用電気・電子機器では搭載部位と車種に応じた振動試験、機械的衝撃試験の条件が細かく定められている。
- ・ 車載用電気・電子機器の振動・機械的衝撃試験、熱衝撃試験、鋼球落下試験を実施したところ、ガラスモジュールに比べて樹脂モジュールではより顕著な劣化が見られた。自動車部品に特有の環境負荷に起因する劣化挙動がモジュールの材料や構造により大きく異なることを示しており、研究開発・製品化の過程において、これらの試験を適宜実施することが望まれる。

3.1.5 乗用車への太陽光発電搭載によるレジリエンス効果

災害等による非常時において、電気自動車や太陽光発電はいずれも系統遮断等が生じた地域の非常用電源としての役割を果たし得る。太陽光発電システム搭載自動車は、日中に発電する太陽光発電と外部からの充電が必要な電気自動車の蓄電池を組み合わせた効率的な独立電源となる。

- ・ 電気自動車の利点として、被災時の非常用電源としての活用が挙げられるが、太陽光発電の搭載により、非搭載の場合と比較してレジリエンス効果を高めることができる。
- ・ レジリエンスの効果は、供給と需要のバランスに加え、車載太陽電池で得られた余剰エネルギーを災害救護拠点へ融通・運搬する過程も重要となり、被災時の社会行動も影響を及ぼす。
- ・ 車載太陽電池の効果を引き出すためには、公共財としての特性を活かした使い方が好ましいと考えられるが、インセンティブ設計が重要である。

3.2 今後の課題と展望

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。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CO₂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。

出力1 kW規模の太陽光発電を搭載する乗用車では、太陽光発電電力により約7,000 km/年の走行が可能となり、CO₂排出削減に加え、外部からの電力充電の最小化（省電力および充電頻度低減）につながる。乗用車への太陽光発電搭載は、現時点では、期待できる効果に対して経済性が及ばないが、自動車への搭載は小型車両や商用車、トラック・トレーラー等の大型車両へと広がり、大型車両への太陽光発電搭載は近い将来の市場化が期待される。

自動車への太陽光発電搭載に係る電氣的な設計技術は向上し、車両走行時の周辺建物等による日射遮蔽や太陽電池モジュールの設置面積や設置場所の広がり、車体曲面等による影響を評価する手法や発電電力量の予測手法の精度も向上している。また、車両の走行パターンとともに太陽光発電搭載の効果左右する蓄電池について、商用車に太陽光発電を搭載する際の蓄電池のSOCをシミュレーションし、蓄電池容量や充放電制御等の設計を支援するモデルが開発されつつあり、乗用車向けにも適用可能となることが期待される。

乗用車屋根搭載用等のモジュールは開発途上であるが、自動車部品に特有の環境負荷に起因する劣化挙動はモジュールの材料や構造により大きく異なる。車載太陽電池は定置型に比べて要求寿命は短い、必要な試験項目が多岐にわたり、効率的な試験方法の確立が望まれる。

以上の知見を踏まえ、太陽光発電システム搭載自動車の実用化に向けた課題と展望を示す。

3.2.1 今後の課題

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世界各国で活発化しており、欧州では本格的実用化に向けた技術開発のKPIを設定して、取り組みを強化している。

日本においても、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きているが、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、実証走行による継続的なデータ取得と解析、モジュール設計・開発技術、実用化を支える評価技術・試験方法の確立、システムとしての低コスト化など、表 3.2-1 のような取り組みをさらに加速させていく必要がある。

る。

商用車も含めた太陽光発電システム搭載自動車の実証走行を継続的に実施し、様々なデータを取得し、それらのデータの分析精度を向上させることにより、信頼性の高い効果予測や設計技術を導くことができる。あわせて、太陽光発電のみならず蓄電池特性も含めた車両性能を的確に把握・分析することにより、車両としての設計の最適化が可能となる。

また、多様な車両に適合していくため、様々なタイプや形状の太陽電池モジュール設計ならびにシステム化技術を進展させていくこと、ならびに、車両の一部となる太陽電池モジュールの発電設備および自動車部品として求められる性能およびその標準化、性能試験方法などを開発していくことが必要であり、これらはガイドラインや標準仕様として定めていくことが望まれる。

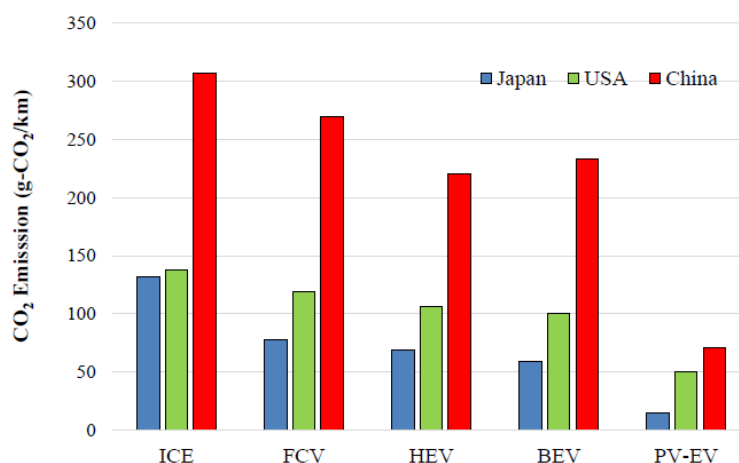
そして、ユーザーに受け入れられるための太陽光発電システム搭載自動車、ならびに太陽光発電システム機器としての価格水準を把握し、その実現に向けたコスト低減が非常に重要となる。

表 3.2-1 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の実証走行と効果の検証	・ 多様な太陽光発電システム搭載自動車の開発と実証 ・ 様々な地域や環境、走行パターンによる実証走行を通じたデータの取得と解析 ・ シミュレーションモデル等を活用した効果予測 ： 燃費削減、二酸化炭素削減、電費削減、経済効果、社会的な効果等 ・ 実証走行を通じた効果検証と設計技術への反映
太陽光発電システム搭載自動車設計技術の確立	・ 実証走行や効果検証に基づく、太陽光発電システム搭載自動車設計の最適化 ： 蓄電池特性も考慮した太陽光発電システム搭載システム設計 ： 蓄電池フル充電時における太陽光発電電力の有効利用（外部への供給：V2X）
モジュール設計と解析、システム化技術の開発	・ 高耐久性・超軽量フレキシブルモジュールの設計および開発 ： 機械的ストレスや電に耐性を有するモジュール ： 車載用としての振動対策、部分影対策、外観の調整 ： フレキシブル性の向上（→車載、営農、建材などの用途拡大に応用可能） ・ 3D 曲面 PV の評価・実証データ解析と最適化設計技術開発 ： 3D 曲面 PV の内部応力等の評価解析 ： 車体形状に応じた、性能、耐久性を両立したワンストップソリューション技術開発 ： ペロブスカイトなどの次世代太陽電池の特性を生かしたシステム設計
性能評価試験方法の開発	・ 曲面モジュールの電氣的、機械的性能の試験方法の開発と標準化 ・ 自動車部品としての信頼性評価項目の特定と試験方法の開発、標準化
実用化に向けたコスト低減	・ 搭載車種やモジュール種類などに応じたモジュール・システムコスト目標の設定

3.2.2 今後の展望

図 3.2-1 に、日本、米国、中国における種々の自動車の 1km 走行当りの CO₂ 排出量の比較¹を示す。クリーンな自動車として期待されている電気自動車においても、太陽光発電等再生可能エネルギーの導入が必須である。このような背景もあり、太陽光発電システム搭載自動車の開発が重要である。米国エネルギー省のシナリオ²によれば、2050 年には、太陽光発電は電力の 45%を占め、1,600 GW の累積導入量で、輸送分野はその 20%、320 GW の累積導入量を見込んでいる。



(ICE : 内燃自動車、FCV : 燃料電池自動車、HEV : ハイブリッド自動車、BEV : 電気自動車、PV-EV : 太陽光発電システム搭載自動車 (電動車両))

図 3.2-1 日本、米国および中国における種々の自動車の 1km 走行当りの CO₂ 排出量の比較

車載用太陽電池として、まず、高性能化が要求される。図 3.2-2 に、1 日 30km の走行に要求される太陽光発電システム搭載自動車の太陽電池モジュール設置面積とモジュール効率の試算結果 (国内でも日射の良好な名古屋市の平均日射量 4 kWh/m²/day と自動車の電費 (km/kWh) のパラメータとして計算)³を示す。現行の乗用車の屋根とボンネットをフルに利用できるとしても、少なくとも 30%以上の発電効率が必要であることがわかる。太陽電池の高効率化は、走行距離ばかりでなく、太陽光発電システム搭載自動車の CO₂ 排出量の削減にも有効である。

図 3.2-3 に、太陽光発電システム搭載による電気自動車の CO₂ 排出量削減効果に及ぼす太陽電池の高効率化のインパクト⁴を示す。運輸部門からの CO₂ 排出量は全世界の排出の約 24%を占め、その中の約 44%が乗用車からの排出と報告されており⁵、CO₂ 排出量の削減の意義は大きい。電費 10 km/kWh の場合、効率 30%の太陽電池モジュール搭載により、約 63%の CO₂ 排出量の削減が期待される。図 3.2-3 に示すように、太陽光発電システムを搭載したプリウス実証車の場合 (電費は 9.35 km/kWh)、約 62%の CO₂ 排出量の削減が実証⁶されている。太陽電池の高効率化は電気自動車の充電コストや充電回数の低減にも有効であり、電費 10 km/kWh の場合、効率 30%の太陽電池モジュール搭載により、年間約 150 USD の充電コスト削減が期待される⁴。

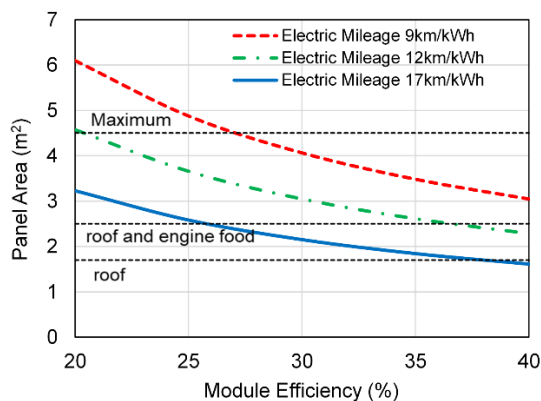


図 3.2-2 1 日 30km 走行に要求される太陽電池搭載自動車の太陽電池パネル設置面積とモジュール効率

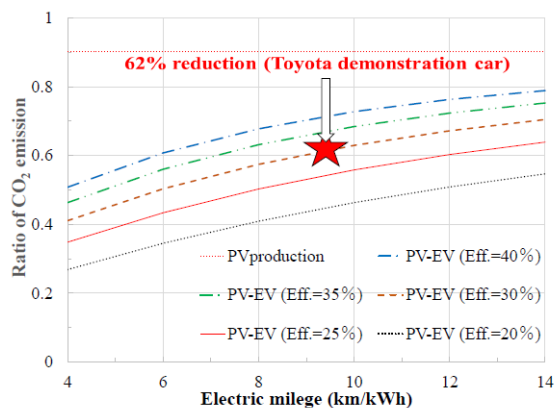


図 3.2-3 太陽電池搭載による電気自動車の CO₂ 排出量の削減効果に及ぼす太陽電池の高効率化のインパクト

太陽光発電システムの低コスト化も、太陽電池搭載自動車の広範な普及に必須である。トヨタ自動車(株)の顧客 5,000 名の調査⁷⁾によれば、図 3.2-4 に示すように、効率 30%、コスト 1.5 USD/W の太陽光発電システム搭載自動車が開発されれば、約半数の顧客が高い関心を示している。

図 3.2-5 には、車載用太陽電池のオプション価格とコスト低減の方向性を示す。トヨタ自動車(株)が販売している太陽光発電システム搭載自動車 (2009 年のプリウスから 2022 年 bZ4X まで) における太陽光発電システム搭載のオプション価格は 21.6～28.6 万円で、4,000 円/W から 1,200 円/W へと低減している。太陽電池出力 200 W では、前述したように、太陽光発電システム搭載自動車の魅力は低く、1kW 規模の太陽電池を 20～30 万円で提供する必要がある。このためには、図 3.2-4 にも示したように、モジュールコスト 1.5 USD/W 以下の実現が必要と考えられる。

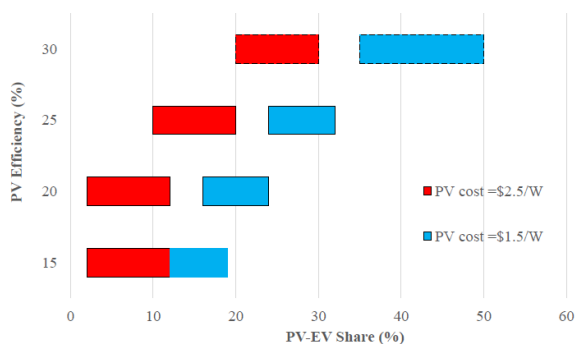


図 3.2-4 トヨタ自動車の顧客の高効率・低コスト太陽電池に対する期待

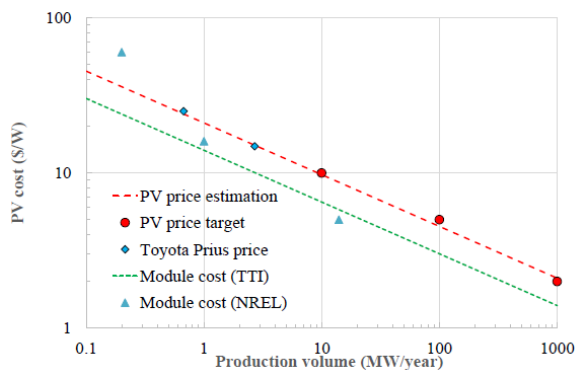
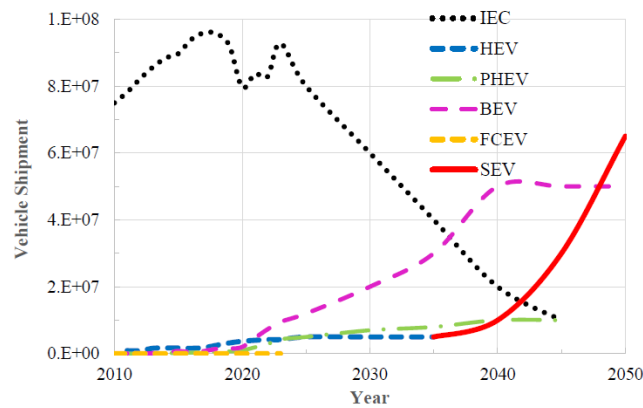


図 3.2-5 車載用太陽電池コストの方向性

太陽光発電システム搭載自動車の本格的な実用化に向けては、太陽電池、自動車車両の開発・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が必要となる。そのためには、太陽光発電のみならず、中長期的な自動車の走行技術や市場に関するロードマップにおいても、図 3.2-6 に示すように、太陽光発電システム搭載自動車が、将来の主要な自動車として位置づけられることが望まれる。



(ICE:内燃自動車、HEV:ハイブリッド自動車、PHEV:プラグインハイブリッド自動車、BEV:電気自動車、FCEV:燃料電池自動車、SEV:太陽光発電搭載自動車)

図 3.2-6 各種自動車の変遷⁸と今後の予想

太陽光発電システム搭載自動車への取り組みは活発化しているものの、実用化に向けた道筋は緒についた段階である。また、太陽光発電技術開発同様に、電動車両の開発に向けた取り組みも世界各国で活発化し、競争が激しくなっている。

太陽光発電、自動車双方の視点に沿った取り組みを継続的に展開し、太陽光発電システム搭載自動車の普及拡大を実現するとともに、その市場拡大を契機とした国内関連産業の活性化につながっていくことが期待される。

【第 3 章 参考文献】

- ¹ M. Yamaguchi et al., Prog. Photovolt. 29, 684 (2021).
- ² B. Jones, presented at the 49th IEEE PVSC, Philadelphia, June 5-10. 2021.
- ³ T. Masuda et al., Solar Energy 146, 523 (2017).
- ⁴ M. Yamaguchi et al., Energy and Power Engineering 13, 147 (2021).
- ⁵ T. Masuda et al., Proc. 49th IEEE PVSC, (IEEE, New York, 2022) pp. 467.
- ⁶ NEDO, PV-Powered Vehicle Strategy Committee Interim Report,
<https://www.nedo.go.jp/content/100885778.pdf>.
- ⁷ T. Hara et al., SAE Technical Paper 2016-01-1286, 2016, doi:10.4271/2016-01-1286.
- ⁸ IEA. Global EV Outlook 2024, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.

「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」（所属は2025年3月末日時点）

本調査レポートは、NEDOの委託により、みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱が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電気電子工学プログラム 教授
荒木 建次	国立大学法人宮崎大学 GX 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 教授
岩崎 真也	トヨタ自動車株式会社 CN システム開発部 CN システム企画室 太陽電池開発グループ 主任
植田 譲	学校法人東京理科大学工学部電気工学科 教授
十楚 博行	シャープエネルギーソリューション株式会社化合物事業推進部 部長
富田 要介	日産自動車株式会社総合研究所 EV システム研究所 課長代理
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
水野 英範	国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センター太陽光システムチーム 上級主任研究員
山口 真史	学校法人トヨタ学園豊田工業大学 名誉教授・招聘研究員

（オブザーバー）

田中 誠	太陽光発電技術研究組合 事務局長
寺川 朗	太陽光発電技術研究組合 技術部長
山田 昇	長岡技術科学大学技術科学イノベーション系（兼機械系） 教授
佐藤 大輔	国立大学法人宮崎大学工学教育研究部電気電子工学プログラム 准教授
高本 達也	国立大学法人宮崎大学 GX 研究センター 特別教授

<事務局>

鈴木 敦之	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 再生可能エネルギー部太陽光発電ユニット チーム長代理
野本 洋一	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 再生可能エネルギー部太陽光発電ユニット 主査
小林 実	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 再生可能エネルギー部太陽光発電ユニット 専門調査員
河本 桂一	みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱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
桐原 貴大	みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱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
高津 尚人	みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱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
豊田 涼平	みずほリサーチ&テクノロジーズ㈱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