

# 3 接合化合物太陽電池搭載自動車の公道走行試験の概要

## Public road driving tests of Toyota Prius equipped with high-efficiency III-V triple-junction PV modules

山口真史\*, 増田泰造\*\*

### 1. はじめに

太陽電池搭載自動車は、CO<sub>2</sub> 排出量の大きな削減が期待される<sup>1)</sup>。自動車へ出力 1kW の太陽電池(PV)を搭載することで、日本国内の約 70 % の乗用車が太陽エネルギーのみで走行が可能と試算されてい

る<sup>2)</sup>。本稿では、まず、車載用太陽電池として、高効率太陽電池の重要性を述べる。高効率 III-V 族化合物半導体 PV モジュールを搭載したプリウス PHV による公道実証走行試験を行い、車載 PV による CO<sub>2</sub> 排出量低減効果の評価を報告する。

### 2. 車載用太陽電池の高効率化の重要性

車載用太陽電池の設置場所は乗用車の屋根であり、その面積は限られている。乗用車の駆動に必要なエネルギーを稼ぐため、まず必要なのは高い発電性能である。図 1 に、1 日 30 km 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/m<sup>2</sup>/day と自動車の電費 (km/kWh) のパラメータとして計算)<sup>3)</sup>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% 以上の発電効率と自動車の電費 EM 向上（軽量化）が必要であることがわかる。

図 2 に、太陽電池搭載による電気自動車の CO<sub>2</sub> 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<sup>4)</sup>を示す。運輸部門からの CO<sub>2</sub> 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<sup>5)</sup>、CO<sub>2</sub> 排出量の削減の意義は大きい。太陽電池の高効率化は、電気自動車の CO<sub>2</sub> 排出量の削減に有効であり、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、約 63% の CO<sub>2</sub> 排出量の削減が期待される。図 2 に示すように、トヨタ自動車プリウス実証車の場合（電費は、9.35 km/kWh）、約 62% の CO<sub>2</sub> 排出量の削減が報告<sup>6, 7)</sup>されており、計算結果と良い一致が示されている。

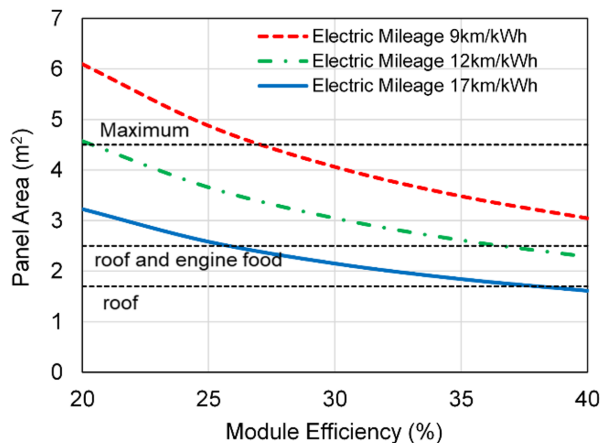


図 1 1 日 30km 走行に要求される太陽電池搭載自動車の太陽電池パネル設置面積とモジュール効率

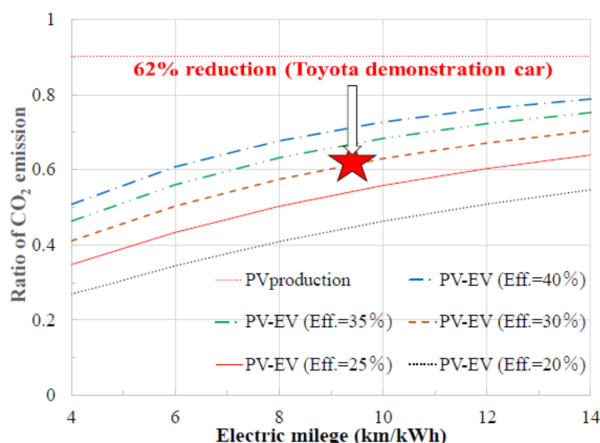


図 2 太陽電池搭載による電気自動車の CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果に及ぼす太陽電池の高効率化のインパクト

\* 豊田工業大学, \*\* トヨタ自動車

図3に、太陽電池搭載による電気自動車の充電コスト低減効果に及ぼす太陽電池の高効率化のインパクト<sup>8)</sup>を示す。太陽電池の高効率化は、電気自動車の充電コスト低減に有効であり、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 ドルの充電コスト削減が期待される。

本プロジェクトにおいては、車載用太陽電池として、世界最高効率が得られているシャープ製3接合太陽電池モジュール<sup>9)</sup>を用いた。

### 3. 実験方法

トヨタ自動車(株)では、NEDO、シャープ(株)と共同で、市販のプリウス PHEV (バッテリー容量 8.8kWh) 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 まで高めた実証試験車を製作した (図 4)。

表 1 に、実証試験車と商用車 (2017 年) の仕様比較を示す。商用車 (2017 年出荷) には、パナソニッ

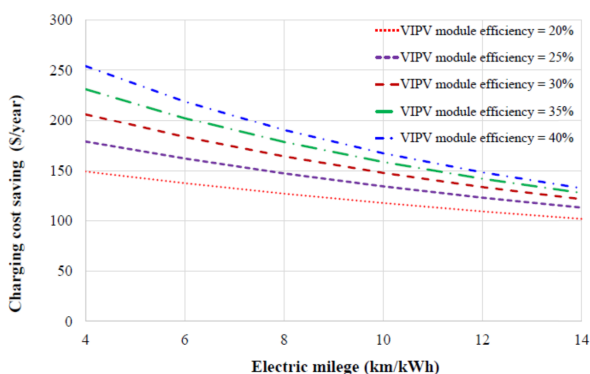


図 3 太陽電池搭載による電気自動車の充電コスト低減効果に及ぼす太陽電池の高効率化のインパクト

ク製 Si ヘテロ接合太陽電池 (平均セル効率 22.5%) が搭載され、180W 出力である。実証試験車には、シャープ製 3 接合太陽電池 (平均セル効率 34%以上) が搭載され、860W と大幅に発生電力を向上させたことに加え、市販車両では駐車中のみに行っている駆動用バッテリーへの充電を、実証試験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。実証試験車を用いて、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。車載 PV の発電量、全天日射量、走行距離、駆動用蓄電池の残量 (SOC)、モジュール温度などを測定し、CO<sub>2</sub> 排出量低減効果の詳細評価を行った。

表 2 には、トヨタ Prius 実証試験車の走行試験条件を示す。走行試験は、主に、愛知県の豊田市、名古屋市で行われた。夏季 (5 月~9 月) は、エアコンディショナーの温度は 25℃ とし、冬季 (12 月~

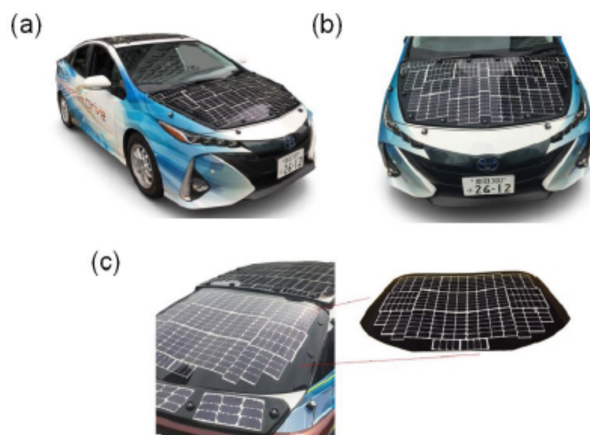


図 4 PV 搭載トヨタ Prius 実証試験車

表 1 実証試験車と商用車 (2017 年) の仕様比較

Model	Demonstration car	Mass production (~2017)
Photo		
Solar cell	III-V based 3J (34%)	c-Si (22.5%)
Installed area	Roof, hood, and back door	Roof
Output power	860 W	180 W
Battery capacity	8.8 kWh	8.8 kWh

2月)は、エアコンディショナーの温度は23℃に固定した。12月～3月は、スタッドレスタイヤが用いられ、4月～11月は、ノーマルタイヤが用いられた。特に、後述するように、エアコンディ

ショナーの使用は、電力消費に大きな影響を与えた。実証試験車の駐車は、ノンルーフ (open-air) 下で行われた。

#### 4. 実験結果および考察

代表的な測定結果として、車載PV発電量とバッテリー残量 (State Of Charge : SOC) の時間変化を図5(a)に示す。SOCは、午前の35kmの走行で66%から24%に低下したが、走行後のPV発電によって58%に回復した。この日の車載PVによる発電量は約4kWh/日であり、太陽エネルギーで30km/日の走行が可能であることが実験的に確かめられた<sup>6)</sup>。

次に、PV走行距離と全天日射量との関係を図5(b)に示す (2021年9月測定)。3接合型PVは太陽光スペクトルによって発電量が変化することや、搭載面の方位がルーフとバックドアやエンジンフードで異なっているが、PV走行距離は全天日射量と比例関係にあることが分かった。その比例定数は6.0(km m<sup>2</sup>/kWh)と見積もられた<sup>6)</sup>。東京の年間日射量は約1200kWh/m<sup>2</sup>/年であり、860Wの車載PVにより年間約7200kmの走行が可能であることが分かった。これは、日本の乗用車からのCO<sub>2</sub>排出量の約65%を削減可能であることを示している<sup>6, 7)</sup>。

表3は、トヨタPrius実証試験車の走行試験結果

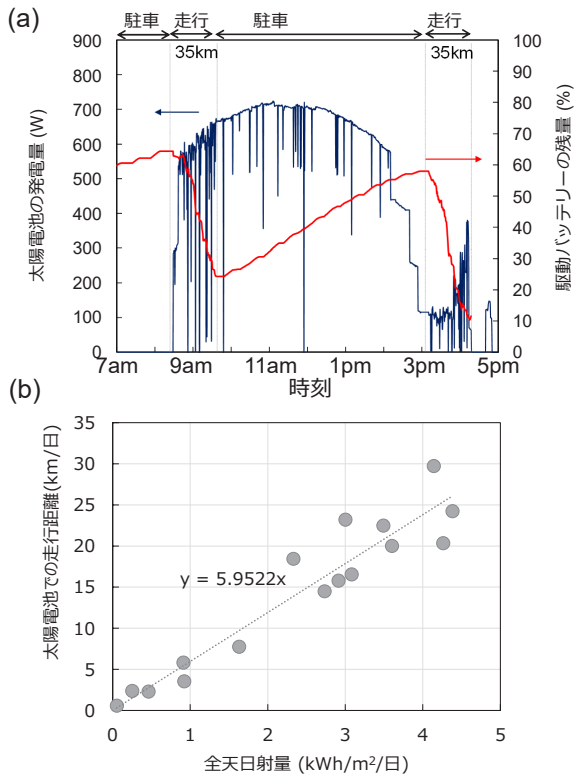


図5 実証試験車の走行試験結果の一例

表2 トヨタPrius実証試験車の走行試験条件

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Tire	Studdles snow tires			Normal tire								Studdless snow tires
Air conditioner	Heat 23℃		OFF		Cool 25℃					OFF		Heat
Ave. outdoor temp (℃)	7.1	5.6	12.7	16.5	20.9	25.2	25.7	31.2	25.0	17.6	14.5	7.8

表3 トヨタPrius実証試験車の走行試験結果のまとめ

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Slope coefficient 1 (GHI → power yield)	0.45	0.58	0.52	0.50	0.49	0.37	0.46	0.28	0.48	0.46	0.44	0.49	
Slope coefficient 2 (Yield → drive range)	6.85	5.91	10.04	11.97	11.19	9.46	9.96	6.89	9.07	10.05	9.33	7.58	
GHI(kWh/m <sup>2</sup> /month)	78.3	98.0	130.0	170.8	169.6	144.1	105.9	180.8	115.8	102.4	93.3	77.5	
GHI was obtained from <a href="https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/">https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/</a>													
Energy yield (kWh/month)	35.6	57.0	67.9	86.1	83.5	53.0	48.4	49.8	55.9	47.4	41.1	38.3	664.0
Solar driving range (km/month)	244	337	682	1031	934	501	482	343	507	476	383	290	6211

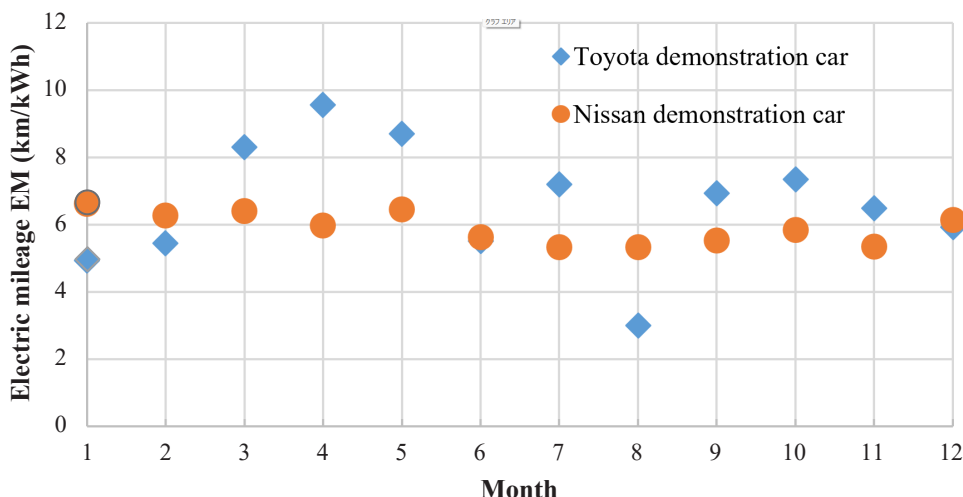


図6 トヨタ Prius および日産自動車の実証試験車の電費 EM の月毎変化

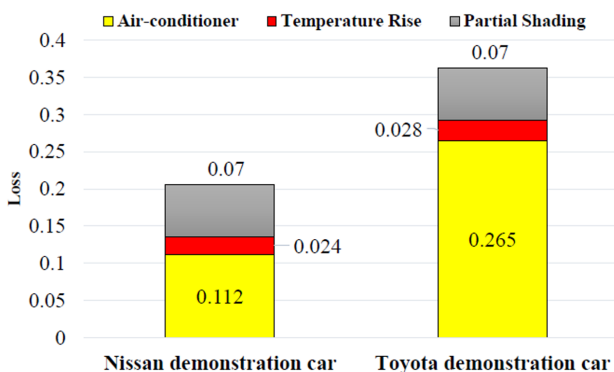


図7 トヨタ Prius 実証試験車と日産自動車実証車の電力損失の比較

をまとめて示す。エアコンディショナーを使用しない温暖な時期には、図5に示すように、30 km/dayの走行が可能だが、表3に示すように、年間の走行距離は6211kmで、一日当りの走行距離は、17 km/dayにとどまる<sup>7, 10)</sup>。

図6に、トヨタ Prius および日産自動車の実証試験車の電費 EM の月毎変化<sup>10, 11)</sup>を示す。夏季と冬季で、電力損失が大きく、太陽電池搭載自動車走行距離の低下を招く<sup>10)</sup>。

図7に、トヨタ Prius 実証試験車と日産自動車実証車の電力損失の比較を示す。エアコンディショナー使用による電力損失<sup>10)</sup>が大きく、部分日影損失<sup>12)</sup>、モジュールの温度上昇による損失<sup>13)</sup>と続く。トヨタ Prius 実証試験車のエアコンディショナー使用による電力損失は極めて大きく、表2に示すように、エアコンディショナーの過剰と思える使用条件が効いていると考えられる。日産自動車の実証試験車のエアコンディショナーによる電力損失は、電気自動車の電力損失<sup>14)</sup>に類似している。

## 5. まとめと今後の展開

公道実証試験から、車載PVの価値が実験的に確かめられた。脱炭素社会を実現する上で車載PVは今後重要な役割を果たすと考えている。特に、高効率太陽電池を搭載した1kW級の太陽電池搭載自動車は有望である。車載用太陽電池として、今回使用した3接合太陽電池は、高価であり、低コスト化が必要である。低コスト化技術として、化合物半導体の高速成膜<sup>15)</sup>、エピタキシャル膜剥離と基板再利用<sup>16)</sup>、Si タンデム太陽電池<sup>17)</sup>などが期待される。

## 謝辞

本稿に紹介した内容の一部は、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) の助成事業の結果得られたもので、NEDOの山田部長、鈴木主研、山崎前主研、野本主査、吉柳前主査、岩田前主査、小林専門員、福島前専門員、石村前専門員、ご協力頂いたトヨタ自動車の佐藤氏、中堂氏、山田氏、岩崎氏、奥村氏、馬淵氏、日産自動車の図子氏、谷本氏、富田氏、シャープの高本氏 (現在、宮崎大教授)、豊田工大の大下教授、小島講師、中村氏、尾崎氏、宮崎大の西岡教授、荒木特別教授、太田准教授、長岡技科大の山田教授、佐藤講師 (現在、宮崎大准教授) みずほ総研の河本氏、PVTECの田中氏の方々に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) NEDO, Interim Report "PV-Powered Vehicle Strategy Committee" (2018). <http://www.nedo.go.jp/english/index.html>
- 2) M Yamaguchi, *et al.*, Prog. Photo. : Res. and Appl. 29 (7), 684-693 (2021).
- 3) T. Masuda *et al.*, Solar Energy, Solar Energy **146**, 523 (2017).
- 4) M. Yamaguchi *et al.*, IEEE J. Photovolt. **13**, 343 (2023).
- 5) K. Kimura *et al.*, SAE Technical Paper (2016). 2016-01-1287. doi : 10.4271/2016-01-1287.
- 6) T. Masuda *et al.*, Proc. 49<sup>th</sup> IEEE PVSC, (IEEE, New York, 2022) pp. 467.
- 7) T. Masuda *et al.*, EPJ Photovolt. **16**, 20 (2025).
- 8) M. Yamaguchi *et al.*, Energy and Power Engineering **13**, 147 (2021).
- 9) Sharp., <https://global.sharp/corporate/news/220606-a.html>.
- 10) M. Yamaguchi *et al.*, Energy Technol. **12**, 202300692 (2024).
- 11) T. Tanimoto, presented at the 33rd Int. Photovoltaic Science and Engineering Conf. (PVSEC-33), Nagoya, Japan, November 2022.
- 12) 廣田他, 自動車技術会論文集 53, 784 (2023).
- 13) M. Yamaguchi *et al.*, Energy and Power Engineering **16**, 131 (2022).
- 14) S. Sagaria *et al.*, Sustain. Energy Technol. Assess. **44**, 100984 (2021).
- 15) R. Oshima *et al.*, IEEE J. Photovolt. **9**, 154 (2019).
- 16) K.A.W. Horowitz *et al.*, NREL Technical Report. 2018. NREL/TP-6A20-72103 November 2018, <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72103.pdf>
- 17) M. Yamaguchi *et al.*, J Phys D Appl Phys. **51**, 133002 (2018).

## 著者略歴



山口真史 (ヤマグチ マサフミ)

1968年北海道大学工学部電子工学科卒業, 同年日本電信電話公社(現NTT)入社. 1978年工学博士, NTT電気通信研究所エネルギー部品研究室長等を経て, 1994年豊田工業大学大学院工学研究科主担当教授. 現在, 同大学名誉教授・招聘研究員. 2008年～2015年新エネルギー総合研究開発機構(NEDO)「太陽光発電技術開発プロジェクト」プロジェクトリーダー, 2009年～2017年科学技術振興機構(JST)CREST研究領域「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成」研究総括. 高効率太陽電池および宇宙用太陽電池の研究開発等太陽光発電への貢献により, 2004年European CommissionよりBecquerel Prize, 2008年IEEE(米国電気電子学会)よりWilliam Cherry Award, 2015年文部科学大臣表彰・科学技術賞(研究部門), 2025年応用物理学会業績賞, 等を受賞.



増田泰造 (マスダ タイゾウ)

2010年工学博士(慶大). トヨタ自動車の東富士研究所グループ長として, 車載用太陽光発電システムの開発, 着色, 軽量, フレキシブル太陽電池の開発, 太陽光励起ファイバーレーザーの開発に従事. 2024年3月逝去.