

Evaluation of durability of vehicle integrated curved solar module through actual driving

Junichi NAKAMURA^{*1‡}Mitsuru ICHIKAWA^{*1}Kenji YAMAMOTO^{*1}

車載用曲面太陽電池モジュールの耐久性の実走行評価

中村 淳一^{*1‡}市川 満^{*1}山本 憲治^{*1}

Abstract

We evaluated the durability of a 3D-curved crystalline Si solar module for vehicle integrated photovoltaics (VIPV) installed on the roof of a commercial vehicle by performing practical operation test for 4 years with a driving distance of ~60,000 km on public roads. To achieve aesthetic design together with high power-output expected for the VIPV module, we utilized heterojunction back contact (HBC) crystalline Si (c-Si) solar cells employed a cell shingling structure. Additionally, we used flat braided copper wires as cell-to-cell connector to enhance the reliability of cell-interconnection, aiming to improve durability against 3D-curvature structure and mechanical stress which should be induced during driving. We demonstrated its advantage in resistance to temperature cycling tests for the HBC c-Si solar cells with the cell shingling structure. By applying these technologies to our 3D-curved solar module, we confirmed that it maintained equivalent power-output performance and appearance after the practical operation test.

Keywords: solar cell, VIPV, curved solar module

キーワード：太陽電池, VIPV, 曲面モジュール

1. まえがき

近年、カーボンニュートラルを目指す動きが世界的に加速する中、太陽光発電システムの普及が、低価格化を背景に急速に進んでいる。2023年までに全世界で累計1.624TW、日本では累計で91.4GWのシステムが導入されている¹⁾。一方、自動車業界においてもカーボンニュートラルを目指す動きは加速しており、ハイブリット車 (Hybrid electric vehicle, HEV)、プラグインハイブリット車 (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)、燃料電池車 (Fuel cell electric vehicle, FCEV)、電気自動車 (Battery electric vehicle, BEV) など多くの電動車の開発、実用化が積極的に進められている。さらに、これら電動車のCO₂排出量の抑制に加え、航続距離の延長、充電の頻度の低減といった価値を提供するものとして、車両に搭載する太陽電池、即ち車載太陽電池 (Vehicle integrated photovoltaic, VIPV) が検討されているが²⁾⁻⁵⁾、一般の市販車への搭載はまだ一部車種に留まっている⁶⁾。

当社ではこれまで住宅の屋根に搭載する太陽電池やビルの壁面に設置するビル建材一体型太陽電池 (Building integrated photovoltaic, BIPV) を開発、商品化してきた^{7,8)}。

これらの用途では、限られた設置面積で高い出力を得るために高い光電変換効率が求められることに加え、住宅やビルのデザインに調和する高い意匠性が求められる。当社はこれまで一貫して高い効率、高い意匠性に拘って開発、商品化に取り組んできた中で、両性能を高いレベルで実現できる結晶Si系太陽電池セルの一種であるヘテロ接合バックコンタクト型 (Heterojunction back contact, HBC) セルや、セルを一部重ねて隙間なく配置することができる、シングリング接続構造などを開発している。また、市販車両に搭載する車載太陽電池では、高いデザイン性への要望に加え、BIPVよりも近距離で目視できることからさらに高い意匠性が求められ、受光面に電極を有しないバックコンタクト型は車載太陽電池に最も適したセル構造の一つである。当社では本HBCセルを用いて高い意匠性を実現する一方で、高効率化開発にも注力し、変換効率で結晶シリコン太陽電池における世界最高レベルの結果を得ている^{9,10)}。

車のボディはデザインや空力特性の要求から基本的に3D曲面であり、当社ではこれまでに3D曲面の車載太陽電池モジュールを開発し、シミュレーション技術も活用しながら、出力特性等を報告している¹¹⁾。車載太陽電池モジュールでは、3D曲面であることに加え、走行中の振動も

*1 Photovoltaic & Thin Film Device Research Laboratories, Kaneka Corporation,
5-1-1, Torikai-Nishi, Settsu Osaka 566-0072, Japan
‡e-mail: Junichi.Nakamura@kaneka.co.jp
Received: September 27 2024, Accepted: February 3 2025

*1 株式会社カネカ 太陽電池・薄膜研究所
(〒566-0072 大阪府摂津市鳥飼西 5-1-1)
‡e-mail: Junichi.Nakamura@kaneka.co.jp
(原稿受付: 2024年9月27日, 受理日: 2025年2月3日)

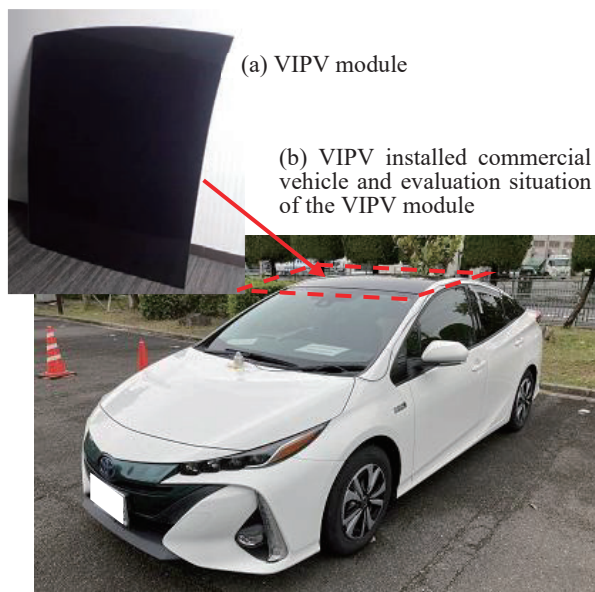


Fig. 1. VIPV module and VIPV installed commercial vehicle
 図1 車載太陽電池モジュールと
 車載太陽電池モジュールを搭載した市販車

加わるため、これまでの住宅用や BIPV とは異なる、車載ならではの構造、使用環境での耐久性が求められる。従来とは異なる構造、使用環境での信頼性評価は、実際の使用状態での確認が不可欠であるが、今回、HBC セルを用いた 3D 曲面の車載太陽電池モジュールを市販車に搭載し、4 年間、その間の走行距離約 6 万 km にわたり公道を実際に走行して発電性能の前後比較を行ったので、その結果を報告する。

2. 実験

本検討で用いた車載太陽電池モジュールは、当社で開発、作製した HBC セルを使用し、セル間に隙間を設けずセル同士を一部重ねて接続するシングリング構造を用いてセルストリングを形成した。シングリング構造はセルとセルの隙間を無くすことで意匠性を良くすることができることに加えて、モジュール内へのセルの充填率を高めることでモジュール変換効率を高めることができる。

次に、セルとセルの間を電気的に接続するインターコネクションについては、その配線材として平編銅線 (Flat braided copper wire) を用いた。先に述べたように、車載太陽電池では 3D 曲面とする必要があることに加え、振動への耐久性が求められる。従って、セルストリングを 3D 曲面に配置することによる接続部へのストレス、走行中の振動によるストレスへの耐久性が必要となる。これに対し、HBC セルのインターコネクションでは、両面電極型セルのインターコネクションと異なり、セル間に S 字曲線形状を有しないことから、インターコネクションにかかる物理的ストレスを緩和しにくい。これらの課題に対し、今回、

我々が用いた平編銅線は一定の伸縮自由度を有するため上記ストレスに対する緩和効果が期待できる。バックコンタクト型太陽電池セル同士を接続するインターコネクションについては、これまでにもセルエッジ同士を接続するものや銅箔を用いて接続するもの、或いは、直線形状や波形状のワイヤーで接続するものなど、様々な方式が検討されてきた¹²⁾⁻¹⁵⁾が、3D 曲面ガラスへ適用し、車載太陽電池モジュールとして実走行で検証された事例は見られない。平編銅線による接続の耐久性は、後述するように、これを用いた太陽電池モジュールの温度サイクル試験により確認した。

実走行試験の車載太陽電池モジュールは、ルーフに一体化したものを自社で作製し、市販車のルーフ部に搭載した。図 1 に、搭載した車載太陽電池モジュールの外観と、これを搭載した市販車の写真を示す。2020 年 5 月に試験前の出力を測定し¹¹⁾、その後、約 4 年を経過、その間に走行距離約 6 万 km を走行し、今回 2024 年 6 月に走行後の出力を測定した。本期間の実走行は一般的と思われる走行状態とすることを意図し、公道の舗装路を中心に一般道路と高速道路が混在するルートを走行した。1 日当たりの走行距離は約 5km~350km と様々として使用状況に偏りが生じないようにした。保管・駐車場所については、可能な限り発電する状態とすることを意図して露天の、建物の影になり難い保管場所を選び、また、出先でも極力露天の駐車場を使用した。また、本期間では激しい降雹や豪雪、落雷の直撃など特殊な気象災害を被ることなく概ね一般的な気象状況であった。

車載太陽電池モジュールの出力特性の測定は、図 1 に示すように、快晴の日に当社大阪工場内の駐車場に停車した状態で行った。I-V カーブの測定には、日本カーネルシステム (株) 社製 PV アナライザ PVA11270 を使用し、太陽光の日射量測定には Hukseflux 社製の日射計 SR05-AA を使用、また、測定中の太陽電池の温度は K 熱電対を太陽電池モジュール裏面に設置し、日射計、熱電対の出力を日置電機 (株) 社製ロガー LR8431 で記録した。測定時の車両の向きは真南から東に 5 度傾いた方向 (方位角 175 度) とし、また、日射計の向きは概ね 3D 曲面の法線を代表する設置位置、設置方向とした。以上は、2020 年に実走行の前の状態として測定した際¹¹⁾の機器類、測定状況を再現したものである。

また、車載太陽電池では意匠性の耐久性も求められるが、これについても同期間の前後で写真、及び、目視により比較して確認した。

3. 結果

3.1 インターコネクションの耐久性

先に述べたように、本検討で用いた車載太陽電池モジュールでは図 2 (a) に示すような平編銅線 (Flat braided copper

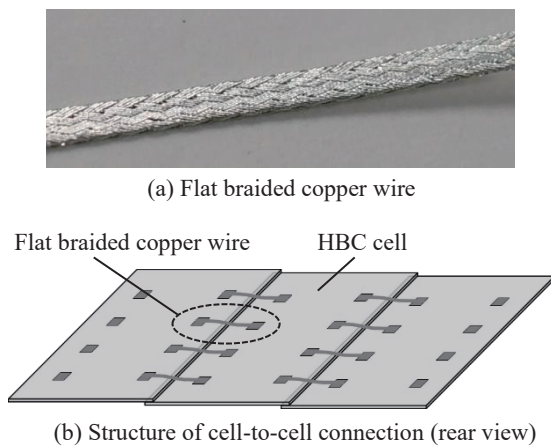


Fig. 2. Interconnection used in the VIPV module

 図2 車載太陽電池モジュールで用いた
インターコネクション

wire) を使用してセル同士を接続した。図2 (b) は、接続の構造を裏面から見た模式図である。隣り合うセルの一部を重ねてシングリング構造とし、セルとセルを平編銅線で接続した。平編銅線はその構造上、伸縮方向に一定の自由度を有し、曲面形状に追従する際に生じる歪応力を緩和する効果や、走行による振動による歪を緩和する効果、温度変動に伴うセル間隔の変化に対する応力の緩和などが期待できる。図3 は、その効果を温度サイクル試験により確認した実験結果である。本実験では、4枚のセルの間を平編銅線と平角タブ線をそれぞれインターコネクションとして用いて接続し、ポリオレフィン (POE) を封止材としてガラス、バックシートで封止したミニモジュールを作製し、温度の昇降サイクル (-40~85°C, 1h/cycle) をかけて出力の変化を確認した。図3の縦軸は出力 (P_{max} , 最大動作点出力) を初期状態を1として規格化した値、横軸には温度サイクル回数を示す。断面が長方形を有する平角タブ線を用いたものと比較して、出力の変化に明確な差が認められ、車載太陽電池モジュールの信頼性を高める効果が期待できる結果を得た。本結果を確認の上、今回の車載太陽電池モジュールでは平編銅線を使用した。

3.2 車載太陽電池モジュールの耐久性

図4に、2020年5月時点と2024年5~6月時点の一日の出力の推移を示す。それぞれの期間で概ね晴れた2日分のデータを示した。左縦軸は、相対出力 (Relative power output), 及び、規格化効率 (Normalized efficiency) を、右縦軸は、相対日射量 (Relative solar irradiation) を示す。相対出力は下記の式(1)で示すように、測定された出力を定格出力で規格化したものである。ここで定格出力は、車載太陽電池モジュールを車体に取り付ける前 (2020年5月時点) にソーラーシミュレータで測定した出力 (測定温度 25°C) を用いた。規格化効率は下記の式(2)で示すように、相対出力を相対日射量で除算して求めたものである。

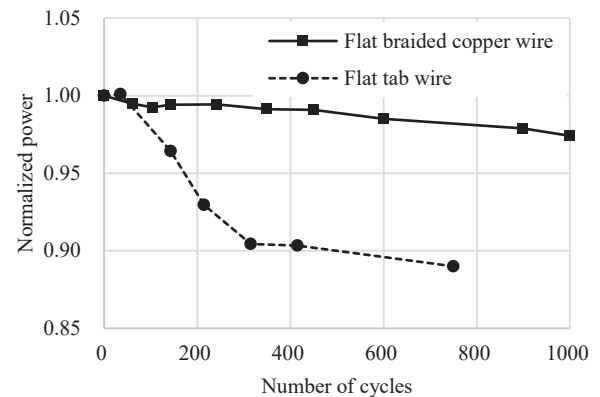


Fig. 3. Thermal cycle test results of the PV module with each interconnection

図3 各インターコネクションを用いた太陽電池モジュールの温度サイクル試験結果

$$\text{相対出力} = \frac{\text{出力測定値 (W)}}{\text{定格出力 (W)}} \quad (1)$$

$$\text{規格化効率} = \frac{\text{相対出力}}{\text{相対日射量}} \quad (2)$$

また、相対日射量は、下記の式(3)に示すように、日射計による日射量測定値と標準日射量 (= 1.0 kW/m²) から求めたものである。

$$\text{相対日射量} = \frac{\text{日射量測定値 (kW/m}^2\text{)}}{\text{標準日射量 (kW/m}^2\text{)}} \quad (3)$$

さらに、各グラフの規格化効率に対しては、これを出力の温度依存性から 25°C に換算した値を示した。2024年5月17日の測定では天候の影響により日中の照度の変動が大きい、2020年5月と2024年5~6月で測定された規格化効率はよく一致しており、約4年間、6万 km の走行距離において顕著な出力変化が無いことが確認できた。2020年5月時点と2024年5~6月時点の測定では1年の内のほぼ同時期に、いずれも晴天日にて、同じ場所、同じ方角に向けて駐車して測定、比較したことから、1日の中での出力の推移についても比較が容易である。測定開始時 (8乃至は9時) から測定終了時 (16時) までの時間推移に着目して比較しても、各特性はほぼ同等であり、3D 曲面に付随した角度依存性についても変化が無いものと類推される。また、図5には、図4で示した出力の測定時に取得した IV 特性を示す。年中の日付が比較的近く、照度も近い値を示した2020年5月28日と2024年5月17日に取得したデータから抜粋して、1時間ごとの IV 特性を示している。入射角が大きくなる時間帯の 9:00 や 15:00 などで見られるステップ状の IV 特性は、斜め方向からの入射に対して、3D 曲面形状によりセルストリング毎に日射量が異なることで発生すると考えられる。R. Moruno らの報告¹⁶⁾でも述べられているように、本ステップ状の IV 特

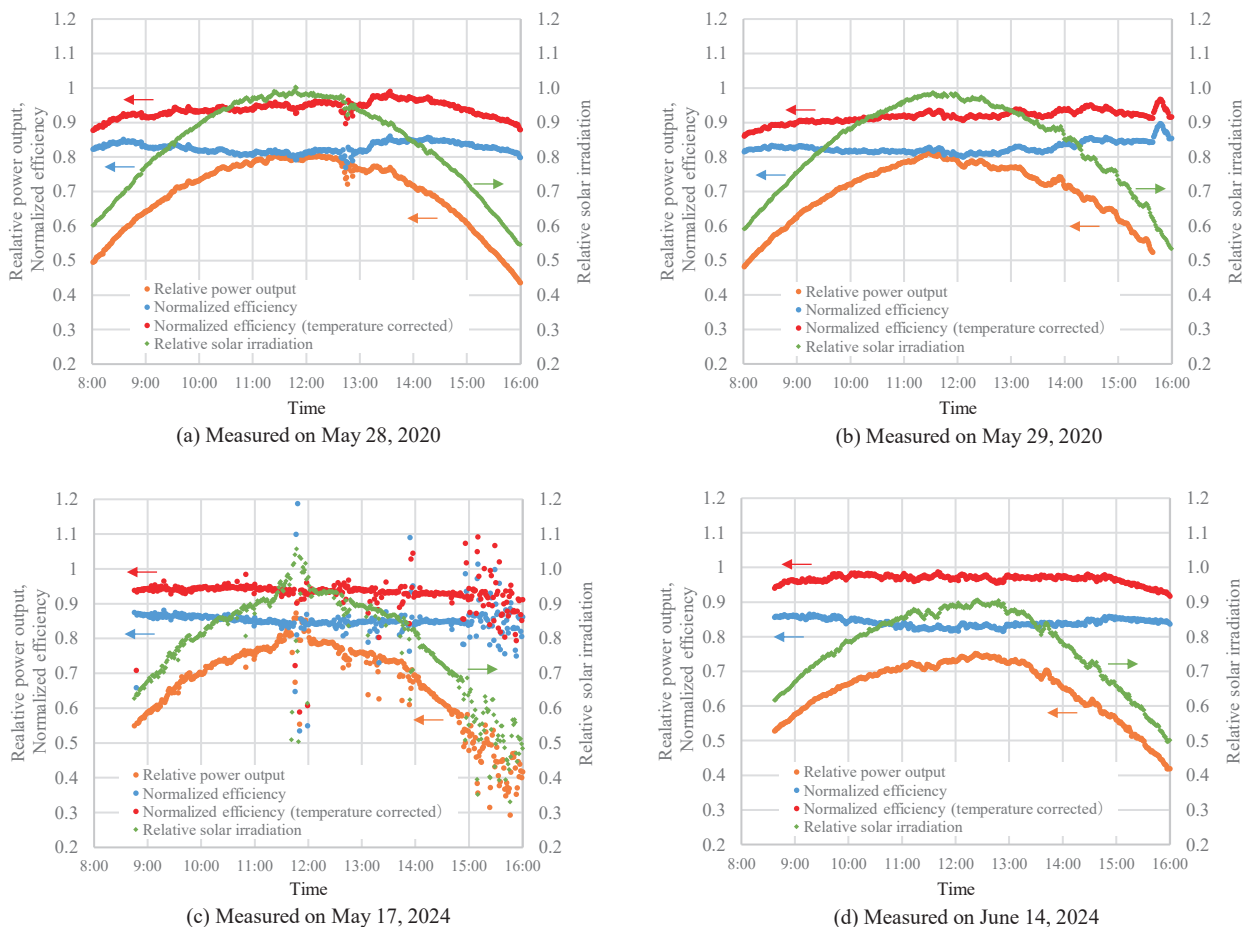


Fig. 4. Daily trends on power output of the VIPV module

図4 車載太陽電池モジュールの一日の出力推移

性はバイパスダイオードが接続されたセルストリング毎に受光量が異なる場合に生じる。図6は、今回の車載太陽電池モジュールのセルの配置とバイパスダイオードの接続構成を示した模式図であるが、本図に示す通り、今回の車載太陽電池モジュールでは、測定時の方角において、途中で折り返した3本のセルストリングの長手方向がほぼ

南北を向き、各セルストリング毎にバイパスダイオードを接続した構成としている。また、本モジュールは中央が凸の3D曲面であり、左右方向から日射を受ける朝夕にストリング毎の日射量の違いが特に大きくなる。IV特性のステップも3段になっており、このストリング毎の日射量の違いにより生じたものと説明できる。これらのステップ状

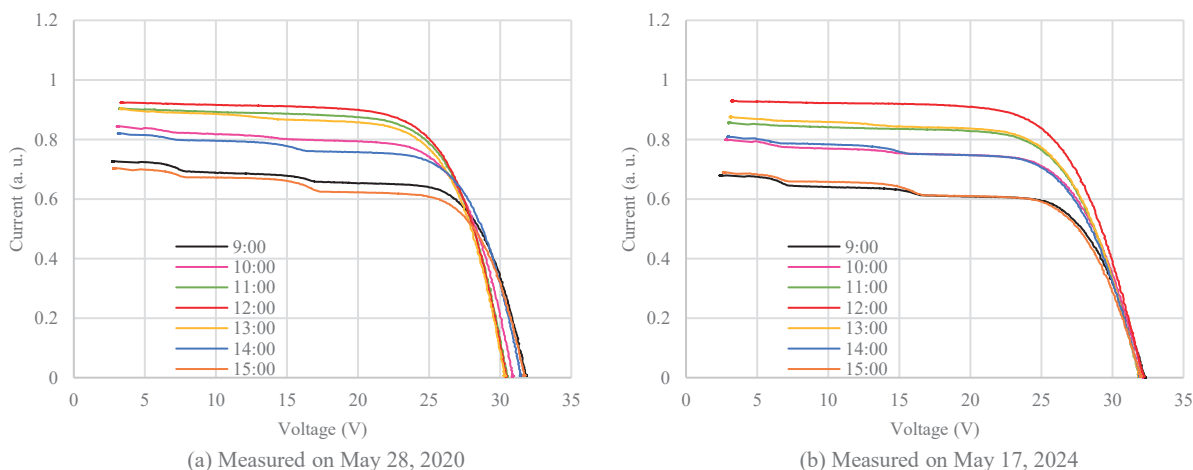


Fig. 5. Hourly measured I-V characteristics of the VIPV module

図5 一時間ごとに測定した車載太陽電池モジュールのI-V特性

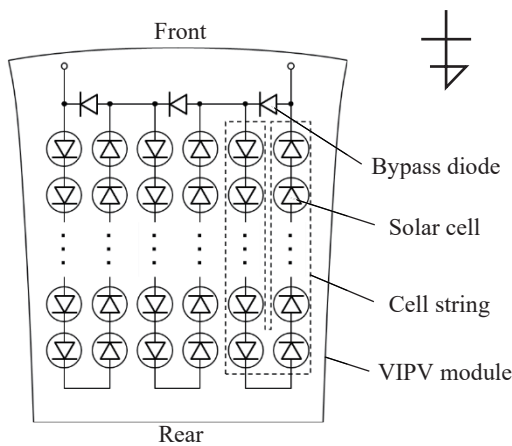


Fig. 6. Cell interconnection scheme of the VIPV module, and direction during measurement

図6 車載太陽電池モジュールのセル、バイパスダイオードの配置と測定時の方角

のIV特性の発現を含めて2020年5月28日と2024年5月17日とで顕著な変化は認められない。

また、車載太陽電池モジュールは車のデザインの一部であることから、その外観にも耐久性が求められる。図7に示すように、初期状態と今回測定時の外観を比較したが、セルの割れや位置ずれ、変色といった目視で確認できる変化は認められず、外観についても顕著な変化が無いことが確認できた。

4. まとめ

本稿では、HBCセルを用いて当社で作製した車載太陽電池モジュールを市販車に搭載し、その前後の特性を比較することで、実際の走行状態での耐久性を確認した。本車載太陽電池モジュールには、当社で開発した、意匠性と発電性能に優れたHBCセルを用い、また、振動や曲面といった車載太陽電池特有のストレスに耐えるよう、伸縮自由度を有する平編銅線を採用した。また、平編銅線を用いたインターコネクションの信頼性を、これを用いたモジュール

の温度サイクル試験により確認し、平角タブ線によるインターコネクションよりも優れた耐久性を確認した。約4年間、その間の走行距離6万kmを、一般的な走行状態と、極力発電量が多い車両保管、駐車の状態、一般的な気象状況の下で実使用し、その前後の2020年5月と2024年5～6月における日中の出力特性を測定、比較し、時間帯による依存性を含めて走行前の発電性能が維持されていることを確認した。また、意匠性についても同期間の前後で比較してセルの割れ、変色などが見られないことを確認し、3D曲面に封止したセルへの振動ストレスに対する機械的な耐久性を含め、意匠性についても顕著な変化が無いことを確認した。

以上により、インターコネクションに平編銅線を用いたHBCセルによる3D曲面車載太陽電池モジュールにおいて、約4年間、その間の走行距離6万kmを実走行で車載太陽電池として期待される発電性能と意匠性について維持できていることを確認した。

謝辞

この成果の一部は、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）との共同研究事業（JPNP20015）の結果得られたものです。

参考文献

- 1) IEA PVPS Snapshot of Global PV Markets 2024 (accessed July 2024), https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2024/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_20241.pdf
- 2) 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 (accessed July 2024), <https://www.nedo.go.jp/content/100885777.pdf>
- 3) 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) (accessed July 2024), <https://www.nedo.go.jp/content/100892361.pdf>
- 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 (3) (accessed July 2024), <https://www.nedo.go.jp/content/>



(a) May 2020



(b) June 2024

Fig. 7. Before and after comparison of the appearance of VIPV module

図7 車載太陽電池モジュールの外観の前後比較

100961854.pdf

- 5) Jubaer Ahmed: "Photovoltaic-powered vehicles: Current trends and future prospects", *Photovoltaics Beyond Silicon*, 647-674(2024), (DOI; <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00019-1>)
- 6) 増田泰造: "車載ソーラーパネル: 運輸分野における CO₂ 排出量低減", *表面と真空* Vol. 66, No. 2, pp. 109 – 113, 2023, (DOI; <https://doi.org/10.1380/vss.66.109>)
- 7) 中島昭彦: "ZEB 実現を目指した次世代 BIPV の開発." *電気設備学会誌* 40(5), 273-276 (2020)
- 8) 中村淳一, 市川満, 山本憲治: "ビル壁面設置太陽光発電システムの発電量評価", *Journal of Japan Solar Energy Society*, 50(1), 23-28 (2024), (DOI; https://doi.org/10.24632/jses.50.1_23)
- 9) K.Yoshikawa H.Kawasaki, W.Yoshida, T.Irie, K.Konishi, K.Nakano, T.Uto, D.Adachi, M.Kanematsu, H.Uzu, K.Yamamoto: "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", *Nature Energy* 2, 17032 (2017), (DOI; <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.32>)
- 10) K.Yamamoto K.Yoshikawa, H.Uzu, D.Adachi: "High-efficiency heterojunction crystalline Si solar cells", *Jpn. J. Appl. Phys.* 57 08RB20 (2018), (DOI; <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RB20>)
- 11) 山本憲治, 中村淳一, 市川満: "車載向け曲面太陽電池モジュールの開発", *OITDA オプトニューズ* Vol.17, No.3 (2022)
- 12) M. Ebert, M. Seckel, L. Böttcher, M. Hendrichs, F.Clement, I.Dürr, D. Biro, U. Eitner, M. Schneider-Ramelow: "Robust module integration of back contact cells by interconnection adapters", *Proceedings of 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2014)*, 225-228, Amsterdam, Netherlands
- 13) V. Rosca, M.J.A.A Goris, L.A.G. Okel, B.B. Van Aken, N. Guillevin, A.A. Mewe, I. Cesar, L.J. Geerligs: "Reliability results for high-efficiency foil-based back-contact PV modules", *Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2015)*, 2537-2540, Hamburg, Germany
- 14) Jonathan Govaerts, Tom Borgers, Patrizio Manganiello, Maarten Debucquoy, Arvid van der Heide, Hans Goverde, Eszter Voroshazi, Jozef Szlufcik, Jef Poortmans: "Multi-wire interconnection for multi-busbar interdigitated back-contact cells: Opportunities and pitfalls in cell-module co-design", *Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2017)*, 262-265, Amsterdam, Netherlands
- 15) L.C. Rendlera, J. Waltera, S. Goldenberga, A.J. Beinerta, S. Wiese, U. Eitner: "Mechanical and electrical properties of wave-shaped wires for low-stress interconnection of solar cells", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 176 (2018), 204–211, (DOI; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.022>)
- 16) R. Moruno, L. San José, F. Martín, R. Núñez, R. Herrero, I. Anton: "Understanding the impact of sky diffuse irradiance on curved photovoltaic modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells* 275 (2024) 113029, (DOI; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2024.113029>)