

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：37401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04338

研究課題名（和文）太陽電池搭載車における走行時の部分影の影響とその対策に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Effects of Partial Shadows and Countermeasures while running on Solar-Powered Vehicles

研究代表者

西嶋 仁浩 (Nishijima, Kimihiro)

崇城大学・情報学部・准教授

研究者番号：50363544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：車載太陽光発電の走行中に生じる部分的な影や泥汚れによる発電量低下を防ぐために考案した分散発電方式を試作し、目標値92%を超える約95%の最大効率を得られた。この分散発電方式に活用するフレキシブル電源を実現するために、非接触充電用のコイルを用いたフレキシブルコイルを作製し、従来のコイルと同等の効率を得られた。走行中の瞬間的な日射量変化に追従する新しい高速制御手法を考案し、目標の10msの高速追従を実現した。既存の制御ICを流用できるので、安価な分散電源を構築できるのも利点である。走行中の日射量変化を高速に測定できる装置を開発し、実走行時のシミュレーションにより20%以上の発電量改善が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでにシール形電力変換回路の開発例はなく、“湾曲面にも貼れる”“振動に強い”“室内空間を邪魔しない”といった、独創的な特徴を持つ太陽光発電システムが実現できた。シール形電力変換回路は、自動車のみならず、宇宙衛星やドローンなど様々な移動体、IoT端末やウェアラブル端末に対して、薄型軽量で湾曲性のある電力変換回路を提供できるので、広範囲に波及効果をもたらす可能性がある。また、10msの瞬間的な日射量変化に追従できる高速制御法を考案でき、シミュレーションによって発電量を20%以上改善できる可能性を示せたことで、自動車用ソーラー発電システムの開発者に対して具体的かつ明瞭な知見を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：A prototype of a new distributed power generation system proposed to prevent a reduction in power generation due to partial shadows and mud stains that occur while an on-board solar power generation runs achieved a maximum efficiency of about 95%. In order to realize a flexible power supply circuit, we made a flexible coil using a flexible magnetic sheet for wireless charging. As a result, we were able to obtain the same power efficiency as a conventional coil. A new high-speed control method devised follow instantaneous changes in solar radiation while traveling, which was able to follow target changes of 10 ms. Another advantage of this method is that constructing distributed power generation system at a low cost since existing control ICs can be reused. We developed a device that can measure the amount of solar radiation at high speed, up to 20% power generation improvement is obtained as a result of simulating using real data from actual driving.

研究分野：電力工学関連

キーワード：太陽電池 車載太陽光発電 部分影 MPPT制御 日射量測定

1. 研究開始当初の背景

車のルーフやドアなどボディ全体に太陽電池を取り付けたらどの程度走行できるのだろうか？ドイツのベンチャー企業が開発している電気自動車（Sono Motors の Sion）は、1日の充電により最大で30kmを走行できるとしている。通勤や買い物であれば太陽光だけで移動できるので驚きである。ただし、これはあくまでも日照条件が最良の時の走行距離であって、実使用環境においては、**建物・街路樹、泥汚れによって生じる部分的な影によって、陰った太陽電池だけでなく直列接続された太陽電池モジュール全体の発電量が低下しかねない。**

部分影の対策としては、太陽電池モジュールを分割してそれぞれ個別に電力変換を行う手法が定置型のソーラー発電システムにおいて商品化されている。しかし、自動車の場合には定置型に比べて小範囲に影や汚れが生じやすいので、発電量の低下を十分に抑制するためには、できる限り太陽電池を分割して電力を変換することが望ましいと考えられる。そのため、ボディに数多く取り付けられる電力変換回路には、薄型軽量で湾曲したボディにも簡単に取り付けられ、かつ、自動車の振動によって壊れにくいものが求められる。一方、自動車は移動体であるがゆえに、ボディ各所の日射量は時々刻々と目まぐるしく変化する。そのため、ソーラーパネルから最大電力を取り出すためには、高速な最大電力追従制御が必要となると考えられる。しかし、**従来の山登り法を用いた最大電力追従制御では、急激な発電量の変化によって不安定現象が生じることが、人工衛星用ソーラーパネルを対象とした検討によって明らかにされている**（中村、岩佐、中原、MPPTの高周波制御周波数領域における安定性解析、電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J99-B, No.4, pp.368-376, 2016年4月）。これらの課題に対し、研究代表者は、電力変換回路を小型・高効率化するための様々な技術をこれまでに検討してきた。例えば、**特許第4552015は、4MHzで動作する市販の世界最高密度の1チップ電源に活用されるなどの実績**がある。また、近年では、電源を薄型・小型化するための技術として、**非接触充電用の磁性シートや高密度実装基板技術（パワーオーバーレイパッケージング）の応用研究に着手**している。さらに、研究分担者は、**太陽光発電システムの高速な最大電力追従制御技術**を有している。

【研究課題の核心をなす学術的「問い」】

解決すべき研究課題
「部分影や汚れに起因する発電電力の低下」や「走行中の日射量急変に起因する発電電力の低下」の定量的な評価と発電電力の低下を抑制するための電力変換回路技術の開発
未解決の課題
(1) ボディ曲面にも簡単に張り付けられる電力変換回路を実現できるのか？
(2) 高速な最大電力追従制御を応用することで時々刻々と変化する日射量に対して発電量をどの程度改善できるのか？
(3) 太陽電池を小分割して電力変換することで発電量をどの程度改善できるのか？

2. 研究の目的

本研究の目的は、大きく分けて次の3項目である。

1	研究代表者の有する小型高効率電源技術、非接触充電用の磁性シートや高密度実装技術（パワーオーバーレイパッケージング）を融合させて、湾曲面にも貼れるシール形電力変換回路を開発する。（研究代表者が担当）目標：厚さ0.6mm、効率95%、動作周波数：2MHz
2	共同研究者の有するニュートン法を用いた高速な最大電力制御手法を自動車用ソーラー発電システムに応用し、従来の最大電力追従制御法に対して高速追従ができることを立証する。（研究分担者が担当）目標：一般的な山登り法に比べて100倍速い制御速度：制御時間10ms
3	モデルベース開発ツールを活用し、自動車の走行モデルにおけるリアルタイムシミュレーションを行う。（研究分担者が担当）さらに、試作機における検証を行い、分割数に対する発電量の改善効果、ならびに、高速追従における発電量の改善効果を定量的に明らかにする。（研究代表者および研究分担者が担当）目標：20%以上の発電量改善

3. 研究の方法

【シール形電力変換回路の開発、高速な最大電力制御技術の適用(令和元年度)】

<割れにくく曲げられる超薄型のチョークコイルの開発> (研究代表者が担当)

目標：コイルの厚さ0.6mm、動作周波数：2MHz

非接触充電用の磁性シートを応用し、割れにくく曲げられるチョークコイルを開発する。磁性シートは0.2mmの厚みしかなく、材料にNi-Znが用いられているのでインダクタンス値を稼ぐことが難しい。そこで、コアの断面積を稼ぐための構造上の工夫を施し、2MHzの動作周波数に対応できる0.6mm厚のシール形のチョークコイルを実現する。

<曲げられて数十Wを出力できる高密度実装基板の開発> (研究代表者が担当)

パワーオーバーレイパッケージング技術を活用したフレキシブル基板を作製する。高速スイッチング素子(GaN-HEMT)のベアチップを、ワイヤーボンディングを用いることなく高密度実装することで、数十Wを出力できる基板を実現する。

<ニュートン法を用いた高速な最大電力制御技術の適用> (研究分担者が担当)

目標：一般的な山登り法に比べて100倍速い制御速度：制御時間10ms

走行中に発生する部分影に対応するために、ニュートン法を用いた高速な最大電力制御技術を活用する。従来の山登り法の最大電力追従制御に比べて、収束精度は同等に保ったまま10msの追従時間を実現することを目標とする。

【小型・高効率電源技術の活用、モデルベース開発ツールによる走行モデルの構築(令和2年度)】

＜小型・高効率電源回路技術を活用したシール形電源の開発＞ (研究代表者が担当)

目標：電力変換回路の厚さ 0.6mm、効率 95%、動作周波数：2MHz

シール形電源を実現するために、研究代表者の有する種々の小型高効率電源回路技術を応用し、パワーオーバーレイパッケージングによって高密度実装を行う。これにより、2MHz の高速動作が実現できれば、磁性シートを用いた薄型チョークコイルを組み合わせたことができる。厚さ 0.6mm で効率 95%のシール形電源を目標とする。



図1 既存のコイルとフレキシブルコイルの比較



図2 フレキシブルコイルを曲げたときの写真

表1 コイルのサイズ等

	厚さ [mm]	インダクタンス
HCV1206-R90-R	5.1	1μH
フレキシブルコイル	1.48	0.84μH

＜モデルベース開発ツールによる既存の太陽光発電システムの評価＞ (研究分担者が担当)

モデルベース開発ツールを活用して実走行モデルを構築し、リアルタイムシミュレーションを行うことで、既存の太陽光発電システムにおける部分影の影響を具体的に明らかにする。

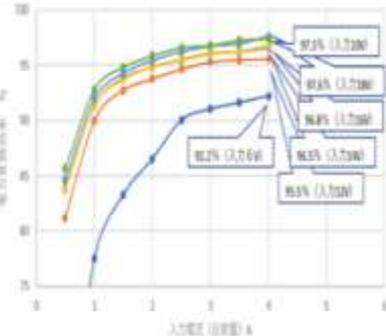


図3 HCV1206-R90の効率

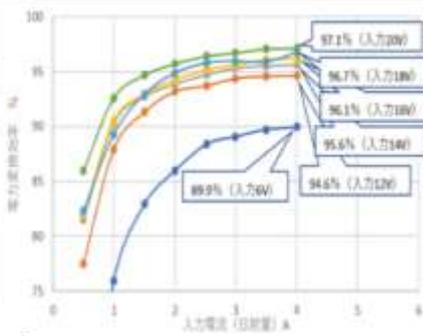


図4 フレキシブルコイルの効率

【分散型のソーラー発電システムの試作とモデルベース開発による有効性評価(令和3、4年度)】

目標：20%以上の発電量改善 (研究代表者、研究分担者が担当)

開発した電力変換回路を小分割された太陽電池モジュールごとに取り付けて、電気自動車のメインバッテリーに充電するシステムの実証試験を行う。さらに、モデルベース開発を用いた実走行時のシミュレーションも行うことで、太陽電池の部分影や汚れに対する発電量の改善効果を定量的に明らかにする。充電システムの最大電力変換効率 92%以上を目標とする。

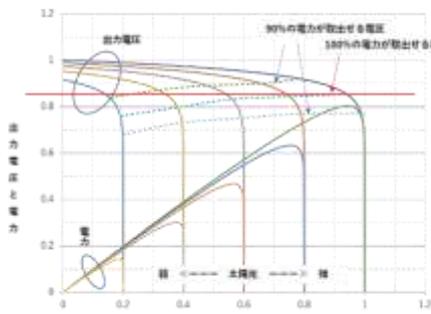


図5 太陽電池の出力特性における90%~100%の発電電力が得られる範囲

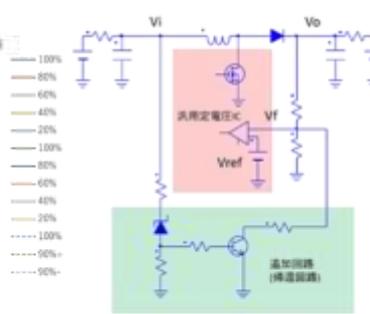


図6 汎用の定電圧ICを使って入力電圧を一定に保つ回路

4. 研究成果

【フレキシブル電源の作製】

非接触充電用の磁性シートを応用し、割れにくく曲げられるチョークコイルを試作した。製作したコイルと比較に用いた HCV1206-R90 のサイズを比較したものを図1に示す。フレキシブルコイルは、既存のコイルに比べて厚さを3分の1以下に薄型化することができた。また、図2に示すように曲げることができる。

図3, 図4 から分かるように、HCV1206-R90 とフレキシブルコイル (今年度) では、入力電圧が高くなるにつれて電力変換効率の差が小さくなり、入力電圧 20V 時では効率にほとんど差がなく同等のコイルの性能になると分かった。広い範囲で目標の 95%以上を達成している。ただし、厚さの目標 0.6mm を達成できなかったため、巻き線を手巻きのリッツ線から平角の銅箔巻き線に変更する等の改善が今後求められる。

【高速電力制御】

太陽光発電の高速制御にはニュートン法を用いることを予定していたが、ニュートン法を用いる場合には、従来の MPPT 制御手法と同様にマイコンによる制御が必要になるので、既存のアナログ IC で低コストに高速最大電力制御をする方法として、簡単なフィードフォワード制御による高速発電電力制御手法を考案した。

この原理を説明する。太陽電池の出力特性は、図5に示すように、日射量が最大の時における太陽電池の開放電圧を1とし、その0.84倍の電圧値で最大電力が得られる場合、この0.84倍の電圧値(赤線)に太陽電池電圧が一定になるように制御を行えば、日射量の変化によって太陽電池からの出力電流量が0.8倍、0.6倍、0.4倍に下がったとしても、ほとんどの電力を回収することができる。0.2倍に減少した場合でも、約90%の電力が回収できる。したがって、日射量に応じて、制御電圧の閾値を変えなくても十分にエネルギーを回収することが可能ということである。

そこで、図6に示すように、太陽電池の出力電圧、すなわち DC-DC コンバータの入力電圧を

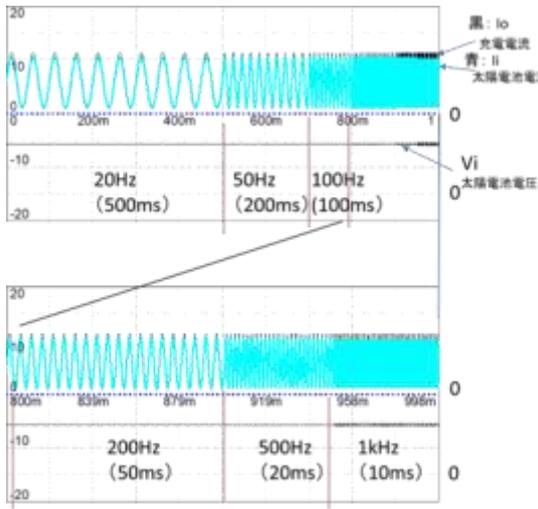


図7 考案した高速制御の応答特性

一定に制御する電力制御手法を試みた。この方式であれば 10ms 以下の高速制御が容易に実現できる。

図7に示すように、太陽電池の発電電流が大幅（約2A~12A）に変動した場合について、考案した高速制御手法が十分にその変化に追従できるかをシミュレーションにより調査した。その結果、発電電流の変化、すなわち日射量の変化が速くなくても完全に追従できていることが分かった。目標としていた 10ms でも全く問題なく追従しており、太陽電池電圧も低下することなく一定値を維持している。

【太陽光発電システムの効率】

提案する分散型太陽光発電システムの効率評価を実施した。本手法は、図8に示すように、太陽電池のモジュールを複数個に分割し、分割したそれぞれの太陽電池から電力を取り出すのが特徴である。これにより、太陽電池の一部に影がなくても、それぞれの太陽電池から最大限に電力を取り出すことができる。本方式については、日産自動車と特許出願済みである（特願 2020-075364）。

非絶縁形コンバータ部分は、“太陽電池から最大電力を取り出す制御”と“充電するメインバッテリーの電圧に応じて電圧を 36V~51V 程度に可変する制御”を担っている。

絶縁形コンバータ部分は、“絶縁”と、“メインバッテリーの電圧変換”を担っている。これらで役割分担をさせることで、それぞれの電源の小型化・高効率化が実現できる。

図9に示すように、システム効率の測定には、絶縁形コンバータ部、Vicor社のBCM380P475T1K2A30を1台用いた。また、非絶縁形コンバータ部には、Vicor社のPI3741-01-LGIZを6台使用した。

その結果、システムの最大効率は、絶縁形コンバータが 97.6%、非絶縁形コンバータ部が 97%であるため、最大総合効率は 94.7%に達する。これは目標の 92%を大幅に上回る結果である。

図10は、極端に日射量や太陽電池の汚れ等が発生した場合を想定し、様々な悪条件を考慮したときの効率である。以下のランダムなばらつきを作って実験を実施した。

- ・入力電流のみのばらつき：入力電流 0.5A, 1.0A, ~2.5A (0~50%の範囲でばらつき)
- ・入力電圧のみのばらつき：入力電圧 25V, 30V, 35V, 40V, 45V, 48V でばらつき
- ・入力電流と入力電圧のばらつき：入力電流 0.5A, 1.0A, ~2.5A (0~50%の範囲でばらつき) 入力電圧 25V, 30V, 35V, 40V, 45V, 48V でばらつき

その結果、電流のみのばらつき、電圧のみのばらつきでは、広い範囲で目標とする 92%以上の効率が得られた。入力電圧と入力電圧の両方をばらつかせた場合には 92%の目標値には届かなかったが、90%前後のエネルギーを回収できることが分かった。

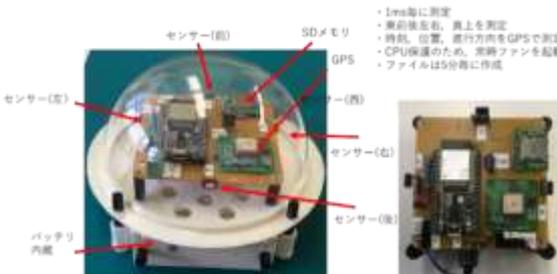


図11 車載用日射量測定装置

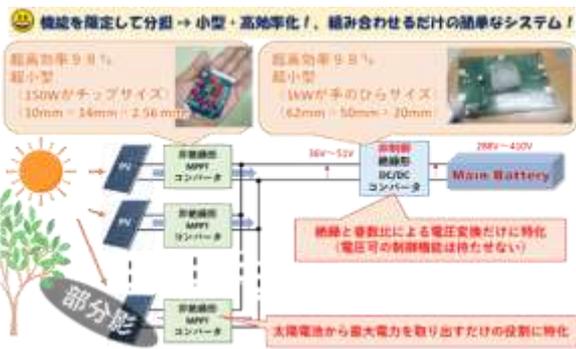


図8 提案する分散型太陽光発電システム



図9 実験装置の外観

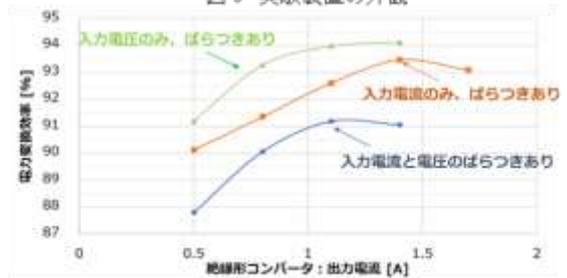


図10 提案する太陽光発電システムのシステム効率

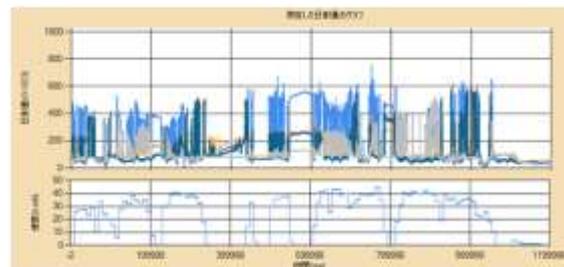


図12 日射量の測定結果

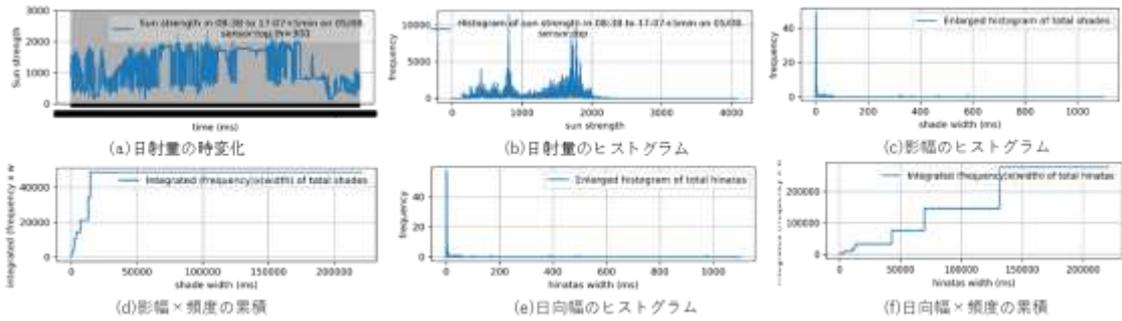


図13 測定した日射量から得られる各種の統計量

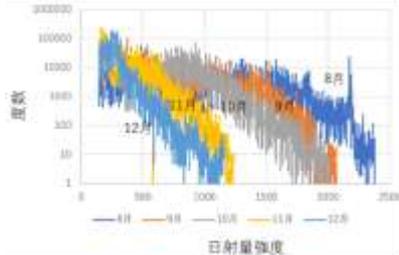


図14 月毎の日射量変化

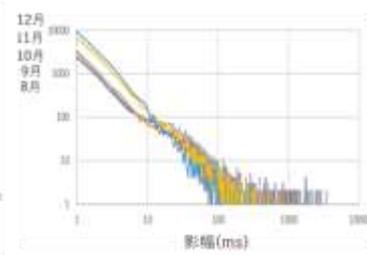


図15 月毎の影幅の分布

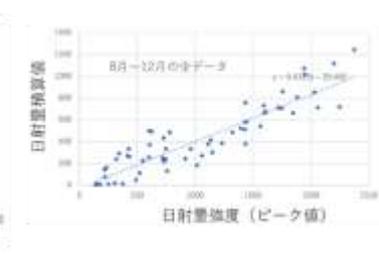


図16 月毎の日射量積算値

【日射量測定と発電量解析】

車載用の日射量測定装置を開発した。1ms 毎のデータ取得を目標（時速 36 km/h で走行したとき、約 1cm 幅の影を取得できる）とした。装置の外観を図 11 に示す。この装置によって取得した実際の日射量データを図 12 に示す。図上は日射量（上側と前後左右の 5 センサーによる測定値）、図下は測定時の走行スピードを示す。この装置を用いて、2022 年 8 月から測定を実施している。12 月までの測定数は以下のとおりである。

- ・ 8 月朝 8:30~9:00×8 日、夕 17:00~17:30×8 日
- ・ 9 月朝 8:30~9:00×9 日、夕 17:00~17:30×8 日
- ・ 10 月朝 8:30~9:00×11 日、夕 17:00~17:30×6 日
- ・ 11 月朝 8:30~9:00×11 日
- ・ 12 月 朝 8:30~9:00×9 日

日射量測定装置で測定したデータを解析するソフトウェアを開発した。このソフトウェアで得られる情報は以下のとおりである。それぞれの結果を図 13 に示す。開発した装置、ソフトウェアを用いて 2022 年 8 月~12 月に収集した日射量のデータから得られた知見は以下のとおりである。

(1) 月毎の日射量強度変化

図 14 に月別の日射量強度の変化を示す。この図から、8 月から 12 月に向かって、日射量の強度が低下していくことがわかる。

(2) 月毎の影幅の分布

図 15 に月毎の影幅の分布を示す。影幅はおおむね 100ms 以下のものがほとんどであること、冬になるにしたがって、影の数が増えること、影幅が 10 倍になると影の数が 10 分の 1 になることなどがわかる。

(3) 日射量の積算値

図 16 に日射量のピーク値に対する日射量の積算値を示す。日射量のピーク値に比例して積算値が増加していることがわかる、積算値は発電量に比例するものと考えられ、日射量ピーク値は太陽高度、方位に関係することから日時の情報から日射量ピーク値が得られ、ピーク値から大まかな発電量の推測ができるものと考えられる。

(4) 高速追従における発電量の改善効果

従来の MPPT 制御では日射量の変化（傾き）が 1Hz 程度であれば応答できるが、図 17 に示すように日射量変化率（ Δ 日射量/測定間隔 1ms）が速くなるほどに追従ができなくなり PV パネルからの発電量の回収効率が悪くなる。

シミュレーションの結果、図 18 に示すように、従来の MPPT 制御による回収量を 100%（縦軸）とした場合、従来の制御速度に対する制御速度（横軸）を高めるほどに発電量の回収率が向上し、10 倍の制御速度にすれば 20%以上の改善が見込めることが分かった。考案した高速制御手法は、図 7 に示すように従来方式よりも 100 倍以上速い 10ms でも問題なく高速に追従できるので制御上の遅れによる回収量の減少は生じない。ただし、考案方式は最大電力点 100%での制御ではなく 95%前後の位置で大雑把に制御を行う手法なので、実質的な改善効果は約 20%程度になることが分かった。

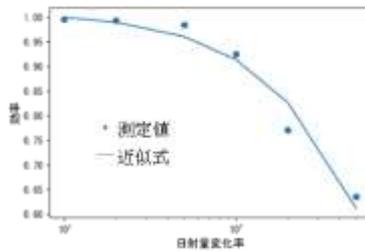


図17 効率曲線

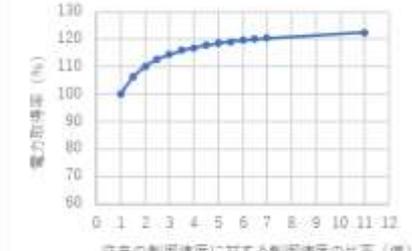


図18 解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tsutomu Tanimoto, Yosuke Tomita, Masanori Saito, Yoshiyuki Nagai, Takumi Arai, Kimihiro Nishijima
2. 発表標題 Demonstration Test of EV Equipped with a Solar Power Generation System that Utilizes Solar Energy for Driving
3. 学会等名 PVSEC-33 (33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Tomita; Masanori Saito; Yoshiyuki Nagai; Tsutomu Tanimoto; Takumi Arai; Kimihiro Nishijima
2. 発表標題 MPPT operation performance of automotive photovoltaic system during driving
3. 学会等名 IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia (2022 International Power Electronics Conference) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Tomita, Masanori Saito, Yoshiyuki Nagai, Yusuke Zushi, Tsutomu Tanimoto, Kimihiro Nishijima
2. 発表標題 Development of an Electric Vehicle with a High-Power Photovoltaic System
3. 学会等名 EVTec 2021(5th International Electric Vehicle Technology Conference 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宇都宮太一、西嶋仁浩、富田要介、荒井拓実、谷本 勉
2. 発表標題 太陽電池搭載車のための自律分散発電システム
3. 学会等名 電子情報通信学会 電子通信エネルギー技術研究会 (EE)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宇都宮太一、西嶋仁浩
2. 発表標題 車載用PVパネルのための薄型MPPTコンバータ用フレキシブルチョークコイルの開発
3. 学会等名 2020年度(第73回)電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宇都宮太一、西嶋仁浩、富田要介、荒井拓実、谷本勉
2. 発表標題 太陽電池搭載車のための自律分散発電システム
3. 学会等名 電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 電力変換装置及び電力変換装置の制御方法	発明者 西嶋仁浩他7名	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2021-175220	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂井 栄治 (Sakai Eiji) (10196032)	崇城大学・情報学部・教授 (37401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	下塩 義文 (Shimoshio Yoshifumi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	村田 勝昭 (Murata Katsuaki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関