研究論文

太陽光発電における分散型 MPPT 制御の導入とソーラーカーへの適用効果

Experimental Introduction of Distributed Maximum Power Point Tracking Systems for PV System and Effect Applied to Solar Car.

松山　剛法 [*1]　伊倉　和弘 [*1]　福北　博史 [*1]
Takanori MATSUYAMA　Kazuhiro IGURA　Hiroshi FUKUKITA
瀧川　洋平 [*2]　金納　朋輝 [*2]　雪田　和人 [*2]
Youhei TAKIGAWA　Tomoki KINNOU　Kazuto YUKITA
水野　勝教 [*2]　後藤　泰之 [*2]　一柳　勝宏 [*2]　依田　正之 [*2]
Katsunori MIZUNO　Yasuyuki GOTO　Katsuhiro ICHIYANAGI　Masayuki YODA

Abstract

This paper describes the distributed maximum power point tracking (MPPT) system for power connected system. Conventional centralized MPPT system is composed by series connection of the each photovoltaic module. When the shadow occurs to the part of PV system, the generation power decreases overall. It is weak point of centralized PV system. The distributed MPPT system will improve power generation efficiency. This MPPT device is attached and controls to each PV module. This study shows superiority of distributed MPPT system, than centralized MPPT system.

キーワード：太陽光発電システム，分散型最大電力追従制御

Key Words: Photovoltaic System, Distributed Maximum Power Point Tracking

1．はじめに

地球温暖化防止のため，太陽光発電システム（以下，PVシステム）が注目されている．特に再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）などの政策より，2013年6月末時点において導入された再生可能エネルギーの発電設備366.6万kWのうち，太陽光発電設備が349.9万kWと約9割を占める(1)．また自動車分野においても，一部の車両で太陽光発電設備を搭載した車両が市販されている．このことから，様々な分野において，PVシステムの研究，開発，導入がなされており(2)~(5)，今後の普及が見込まれると考えられる．

ここでPVシステムの特性上，太陽電池の定格出力電力を得ることは少なく，雲による日射変動や設置環境における障害物などによる影により，発電電力は常に変動する．このPVシステムに用いられる太陽電池（PV）は，セル1枚当たり約0.6V程度の電圧であることから，システム化する場合に多くのセルを直並列接続した状態で最大電力追従制御（MPPT）を行っている．このとき，直列に構成されたストリング内のPVモジュールに影が発生した場合，そのストリングの電流－電圧特性（I-V特性）から，影のかかったPVモジュールのバイパスを行うか否かを判断する．集中型MPPT制御により，影のかかったPVモジュールのバイパスを行った場合，そのPVモジュールの発電を生かすことが出来ないことになる．また，そのPVモジュールをバイパスせずにストリング全体で最適動作点制御を行う場合においても，影のかかったPVモジュールの影響で発電能力が低下する．このことから，いずれの場合でも，高い効率でのシステム運用は困難であることが予想される．

この問題に対処するため，従来からMPPTの多段積み構成や太陽電池アレイの細分化が提案され，多くの研究が行われてきた(6)~(8)．しかしながら，これらの提案はシステムコストの増加が課題と成り，普及の壁となっていた．

そこで著者等は，この問題に対処する分散型MPPTを低電圧動作が可能な高機能スイッチングIC(9)により実現した．この高機能ICは，PWM制御方式を採用した昇圧型DC-DCコンバータであり，同期整流方式を採用している．MPPT機能の演算結果を受けて，PWM信号のデューティ比を制御し，出力電圧及び電流を最適化する．このときのデューティ比の制御範囲は5～90%で，制御ステップは2%で動作を行う．本ICを用いて開発した分散型MPPTモジュールは，適応するPVモジュールの開放電圧の範囲は10V～30V，短絡電流は最大7.5A，出力電圧範囲は23V～37Vである．こ

*1 ソーラーカーチーム柏会　静岡県御殿場市
*2 愛知工業大学工学部電気学科　エコ電力研究センター
〒470-0392　愛知県豊田市八草町八千草1247
(受付：2014年2月14日)

のICを用いて，PVシステムの発電能力向上を目的に，PVモジュール単位でMPPT制御を行う分散型MPPTシステムを開発し実証試験を実施してきた[(10),(11)]．これらの実証試験では，住宅用PVモジュールでの実証試験の結果，部分影のある状況下において，従来の集中型MPPT制御と比較し約18%の発電能力向上を確認した．

そこで，毎年8月に鈴鹿サーキットで行われるソーラーカーレース鈴鹿において，新たにモジュール単位で発電状況を監視するシステムを開発し，800Wの太陽電池を搭載したソーラーカーに対して，分散型MPPT制御を取り入れたシステムを構築した．同システムにおいて，PVモジュール単位での発電特性の測定により，分散型MPPT制御の有効性について検証し，その効果を確認することができた．

そこで本論文では，開発した分散型MPPTシステムと，システム導入時の改善効果及び有効性について検証したため報告する．

２．PVシステムにおけるMPPT制御

2.1 現状のPVシステム構成

現在，主流となっているPVシステムの構成は，図1に示すように集中型MPPTにて制御を行うシステムとなっている．この構成としては，太陽電池モジュールを複数枚直列接続してストリングを構成し，そのストリング単位で逆流防止ダイオードが備わった接続箱を介して系統連系装置（パワーコンディショナー：PCS）に接続される．同図において示しているバイパスダイオード（BD）は，通常PVモジュール内に内蔵されている．このことからシステム構成時の電気的な部材としては，太陽電池モジュール，接続箱，PCSとなり，安易に構築可能な発電システムである．

PVモジュールが複数枚直列接続されたPVストリングにおいて，あるPVモジュールに部分影が生じた場合，そのストリング全体の発電電力は低下する可能性がある．そこで部分影による発電電力低下の影響を少なくするために，各PVモジュールにBDが挿入されている．近年は複数個のBDで構成し，より細かくバイパスできるよう改良したPVモジュールが主流となっている．影により発電電流が低下した場合，このBD単位でバイパスすることで，システム全体に影響が及ばないような対策がなされている．しかしバイパス時では，ダイオードでの通電損失が発生し，影が掛かったPVモジュールでの発電電力が得られず，効率的に電力を得ることができない．

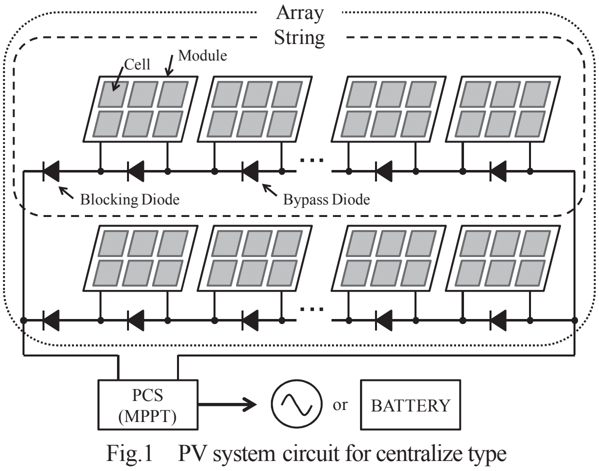


Fig.1　PV system circuit for centralize type
図1　集中型PVシステム回路図

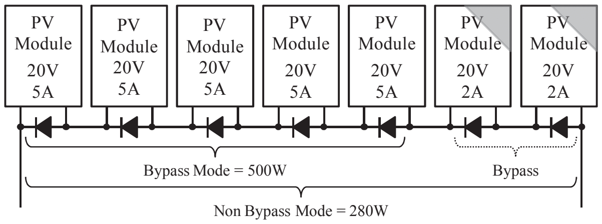


Fig.2　Effect of part shadow for PV String
図2　ストリング構成時の部分影の影響

2.2 ストリングにおける部分影の影響

あるストリングにおける部分影発生時の動作について検討する．図2に部分影の発生を想定した場合の概略図を示す．同図では，ストリング内のPVモジュールの直列数は7直列を想定し，7枚中2枚に部分影が掛かり他の太陽電池モジュールと比較して約40%に低下するものとした．また，部分影のない太陽電池モジュールの動作条件として，最適動作電圧Vpmaxを20V，最適動作電流Ipmaxを5A，発電電力Pmaxを100Wとした．ストリング内に部分影が発生していない場合，各PVモジュールの動作条件は均一である．このとき，Vpmax(St-100%)を100%発電時のストリング最適動作電圧，Ipmax(St-100%)を100%発電時のストリング最適動作電流，Pmax(St-100%)を100%発電時のストリング最適動作電力とすると，ストリングでの特性としては，各数値を代入すると(1)から(3)式で示すことができ，以下の結果を得る．

$$\mathrm{Vpm(St\text{-}100\%)} = 20\mathrm{V} \times 7 = 140\mathrm{V} \quad \ldots(1)$$

$$\mathrm{Ipmax(St\text{-}100\%)} = 5\mathrm{A} \times 100\,\% = 5\mathrm{A} \quad \ldots(2)$$

$$\mathrm{Pmax(St\text{-}100\%)} = 140\mathrm{V} \times 5\mathrm{A} = 700\mathrm{W} \quad \ldots(3)$$

この結果，最大で700Wの発電能力を有することがわかる．しかし，部分影の影響でPVモジュールへの日射強度が低下した場合，日射強度に比例して最適動作電流が変化する特徴がある．そこで，部分影による日射強度が約40%に低下したことを仮定する．このときのPVモジュールの発電能力は，Ipmax(Mod-40%)を日射強度40%へ低下した時のPVモジュールの最適動作電流，Pmax(Mod-40%)を日射強度40%へ低下した時のPVモジュールの最適動作電力とすると，(4)から(5)式により示される．

$$\mathrm{Ipmax(Mod\text{-}40\%)} = 5\mathrm{A} \times 40\% = 2\mathrm{A} \quad \cdots(4)$$

$$\mathrm{Pmax(Mod\text{-}40\%)} = 20\mathrm{V} \times 2\mathrm{A} = 40\mathrm{W} \quad \cdots(5)$$

従って，PVモジュールの発電電力は40Wへ低下する．また，この影響がストリングの7枚のうち2枚に影響が生じて，各PVモジュールに発電のばらつきが生じたとすると，そのストリングの最適動作電流は，影の掛かっている太陽

電池モジュールの最適動作電流に依存する．このとき，Vpmax(St-40%)をIpmaxが40%へ低下した時のストリング最適動作電圧，Ipmax(St-40%)及びPmax(St-40%)を同様に低下した時のストリング最適動作電流及び最適動作電力とすると，(6)から(8)式となる．

Vpmax(St-40%) = 20V×7 = 140V　　…(6)

Ipmax(St-40%) = 5A×40% = 2A　　…(7)

Pmax(St-40%) = 140V×2A = 280W　　…(8)

しかし，PVモジュール単位でバイパスダイオードが挿入されていることを考慮すると，出力が低いPVモジュールはパイパスすることができる．そこで，このときのストリングの発電電力は，Vpmax (St-40%-Bypass)をIpmaxが40%へ低下したPVモジュールをバイパスする場合のストリング最適動作電圧，Ipmax(St-40%-Bypass)及びPmax(St-40%-Bypass)を同様に低下したPVモジュールバイパス時のストリング最適動作電流及び最適動作電力とすると，(9)から(11)式となる．

Vpmax (St-40%-Bypass) = 20V×5 = 100V　…(9)

Ipmax(St-40%-Bypass) = 5A×100% = 5A　…(10)

Pmax(St-40%-Bypass) = 100V×5A = 500W …(11)

この結果，本条件において影が掛かった場合は，バイパス動作することで全体の発電電力の改善ができる．同時に，バイパスされた太陽電池モジュールは各40Wの発電能力を有しているが，この80W分の電力は生かすことができないことになる．

2.3 実環境における部分影発生時のI-V特性

前節において，部分影発生時における発電電力の差について検証した．次に，実フィールド上におけるPVストリングのI-V特性について検討を行った．ここで，部分影発生時におけるI-V特性の検証に使用したPVシステムの外観図を図3に，PVモジュール単体の仕様を表1に各々示す．

Fig.3　Appearance of PV system

図3　PVシステムの外観図

表1　PVモジュールの仕様

Table 1　Specification of PV module

Type	Polycrystal Si
Open Voltage [V]	20.40V
Short Current [A]	4.87A
Maximum Power Point Voltage [V]	15.81V
Maximum Power Point Current [A]	4.43A
Maximum Power [W]	70W

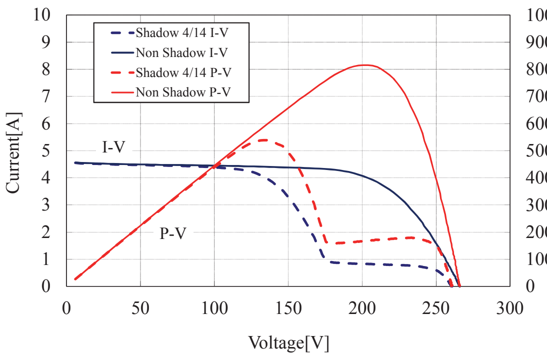


Fig.4　I-V characteristic by the existence of a shadow

図4　影の有無によるI-V特性

表2　影有無による特性値

Table 2　Characteristics by shadow existence

	Non Shadow	Shadow
Shadow Number	0/14	4/14
Amount of Insolation [W/m^2]	1122.80	1137.10
Open Voltage V_{OC}[V]	265.87	260.54
Short Current I_{SC}[A]	4.53	4.53
Maximum Power Point Voltage V_{PM}[V]	203.93	133.32
Maximum Power Point Current I_{PM}[A]	4.00	4.05
Maximum Power P_{MAX}[W]	815.44	539.87

図3に示すPVシステムは，表1のPVモジュール14枚で構成され，本検討においては14枚直列の定格発電電力980Wとなっている．このPVシステムにおけるI-V特性の測定結果を図4及び表2に各々示す．部分影を発生させた場合の条件としては，14枚直列のうち4枚のPVモジュールを遮蔽させ，I-V特性を測定した．また測定器としては，英弘精機製I-VチェッカーMP-170を使用して測定し，影の影響によるI-V特性につて評価を行った．

部分影発生時におけるI-V特性の比較を行ったところ，影を発生させない場合は最適動作点のポイントが一点で，約815Wの発電能力があることが分かる．これに対し，4枚を影にした場合はピークが2点発生していることが分かる．この2点の最適動作点のうち，部分影のある太陽電池モジュールをバイパスしない場合は，約190Wの発電電力であるが，バイパスした場合は約540Wとバイパスすることで発電電力を約2.8倍改善されることがわかる．このバイパスされるPVモジュールの特性について検討すると，約190Wのポイントにおいて最適動作電流で0.8A程度，最適動作電圧は230V程度であることが分かる．このとき，PVモジュール単位での最適動作電圧は，Vpmax(Mod-Shadow)を部分影発生時のPVモジュール単位の最適動作電圧として，直列枚数分から算出すると，(12)式となる．

Vpmax(Mod-Shadow) = 230V/14 = 16.43V …(12)

これより，部分影が生じた4枚の太陽電池モジュールの

合計発電電力は，Pmax(Mod-Shadow)を影が生じたPVモジュールの最適動作電力，Pmax(St-Shadow)をストリング構成時において影が生じたPVモジュールの合計発電電力とすると，(13)から(14)式にて示される．

$$Pmax(Mod\text{-}Shadow) = 16.43V \times 0.8A = 13.14W \quad \cdots(13)$$

$$Pmax(St\text{-}Shadow) = 13.14W \times 4 = 52.56W \quad \cdots(14)$$

このことから，影の生じたPVモジュールをバイパスすることで，約53Wの発電電力が活用できていないことになる．

次に，バイパスする場合のBDにおける損失を算出すると，まず部分影のない場合の太陽電池モジュール単位の最適動作電圧は，Vpmax (Mod-Non Shadow)を影が発生していない場合のPVモジュールの最適動作電圧とすると，(15)式となる．

$$Vpmax\ (St\text{-}Non\ Shadow) = 203.9V/14 = 14.56V \quad \cdots(15)$$

ここで部分影が掛かりバイパスした場合に動作するPVモジュールの枚数は10枚であることから，このストリングの最適動作電圧の計算値は，Vpm(St-Non Shadow-10)を影が発生していないPVモジュール10枚時のストリングの最適動作電圧とすると，(16)式となる．

$$Vpm(St\text{-}Non\ Shadow\text{-}10) = 14.56V \times 10 = 145.6V \quad \cdots(16)$$

測定した部分影発生時のストリングの最適動作電圧133.3Vとの差分は12.3Vとなる．この12.3VがBDにおける順方向電圧であることから，Ploss(St-Shadow-Diode)を影発生時のストリング中におけるBDでの損失電力として計算すると，(17)式となる．

$$Ploss(St\text{-}Shadow\text{-}Diode) = 12.3V \times 4.05A = 49.82W \quad \cdots(17)$$

この結果，49.82Wの電力がバイパスダイオードで消費されていることが分かる．このことから，本測定時における部分影の影響により，太陽電池モジュールの発電電力52.56WおよびBDでの電力損失49.82Wの合計102.38Wの電力が有効に活用できていないことになる．

このことから，ストリング単位でMPPT制御を行う集中型MPPT制御の場合，バイパスすることで最適動作点が最大になる部分影では，これらの電力は得ることができない．それに対して，PVモジュール単位でMPPT制御を行う分散型MPPT制御では，ストリング内における個々の発電ばらつきの影響を少なくできるため，さらに多くの電力を得ることが出来る．

3．分散型MPPTシステム及び実証実験

3.1 分散型MPPTモジュール

前章までにおいて，集中型MPPT制御では部分影発生時では影の掛かっている太陽電池モジュールとバイパス時のダイオードにおける損失分が発生し，効率的な制御ができない可能性があることが分かった．そこで，これらの問題を改善するために，PVモジュール単位でMPPT制御を行う昇圧式MPPTモジュールを開発した．図5に外観図，その仕様を表3に各々示す．

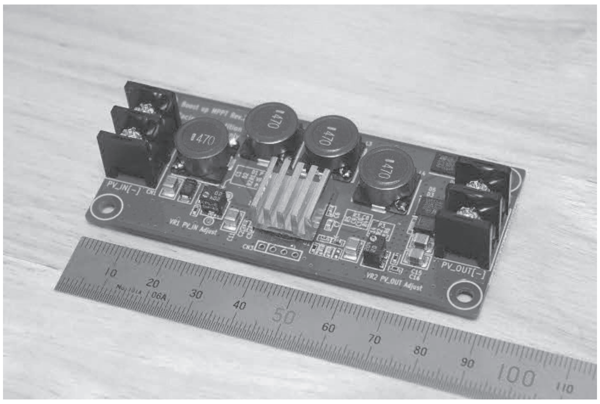


Fig.5　Distributed boost MPPT module
図5　分散型昇圧式MPPTモジュール

表3　分散型MPPTモジュールの仕様
Table 3　Specification of a distributed MPPT module

Optimum PV (1000W/m^2 Value)	Open Voltage: 10V-30V Short Current: 6.5A（Max 7.5A） Maximam Power: 125W
Output Voltage	Input Voltage×1.1 Over Maximam Set Range: 23 - 37V
Protection Function	Over voltage protection Over current protection Over temperature protection
Protection Element	PV Blocking Diode MPPT Bypass Diode Over Voltage Protection Diode
Size	90mm(W)×40mm(D)×19mm(H)
Weight	52g（with Heat-shink）

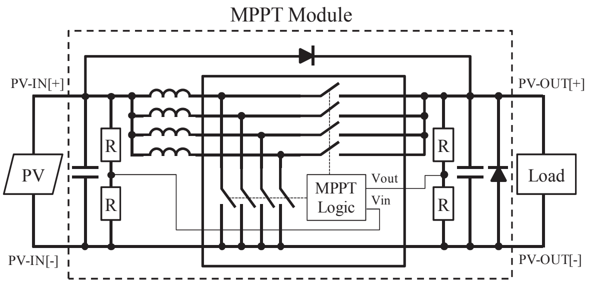


Fig.6　Circuit configuration of MPPT module
図6　MPPTモジュールの回路構成

開発した本MPPTモジュールの特徴として，小型，軽量であり，開放電圧が10Vから30Vと低電圧で動作することからMPPT制御の細分化が容易に行え，従来のBDとの置き換えが可能である．また，高効率であることから，部分影発生時においてもバイパスすることなく効率よく発電電力を利用することができる．

本MPPTモジュールの回路構成としては，図6に示す様に4回路の昇圧回路で構成している．最大の特徴としては，MPPT制御を行う制御回路，同期整流を含めた4回路分のMOSFET素子が1つの素子に組み込まれているものを用い

ていることである．これらの特徴から，小型，高効率を両立したMPPTモジュールを実現した．

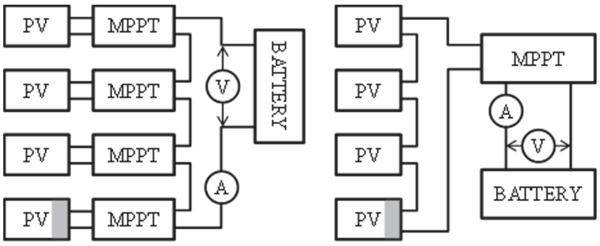
3.2 据置型PVシステムおけるMPPTの比較

開発した分散型MPPTモジュールの有効性を確認するために，前章にて使用したPVシステムを用いて集中型MPPT制御との比較実験を行った．

図7にシステム回路図，表4には本実験での実験装置の仕様を各々示す．各システムにおいて，PVモジュールの直列数は4枚で構成し，分散型MPPTシステムでは各PVモジュールに開発した分散型MPPTモジュールを導入した．各システムにおけるMPPTの出力負荷としては，分散型MPPTシステムでは昇圧式のため平均電圧122.1Vのリチウムイオンポリマー電池モジュール，集中型MPPTシステムでは降圧式により平均電圧48Vの鉛蓄電池モジュールを各々用いた．特性の比較では，各MPPTから出力される発電電力について，比較検討を行った．またPVシステムの最上部にて，日射計による日射量の測定も同時に行った．

また，実験ではPVモジュールに掛かる日射量は均一になる条件で比較を行うために，図8(a)に示すように各システムのPVモジュールを横並びに構成した．部分影を模擬するため，同図(b)の様に各システムのPVモジュール1枚の中に遮光テープを貼付け，PVモジュールの36セル中9セルについて，セル面積に対し4分の1だけ遮光し部分影とした．

図9に1/4部分影を発生させたときのPVモジュールのI-V特性を示す．同図においてPVモジュールに部分影を発生させた場合，最適動作点での発電電力が約8W低下している．I-V特性上，発電電圧は大きく変わらないものの，発電電流



(a) Distributed type　　(b) Centralized type

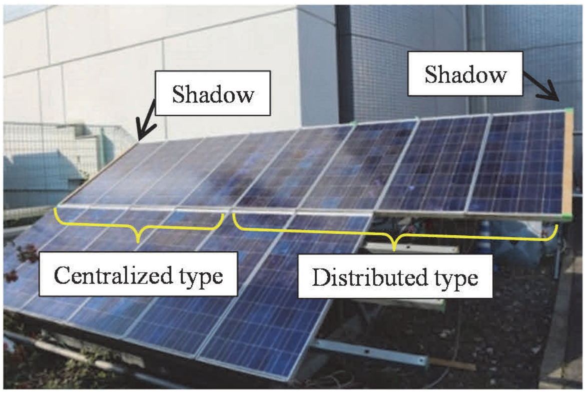
Fig.7　System configuration

図7　システム構成

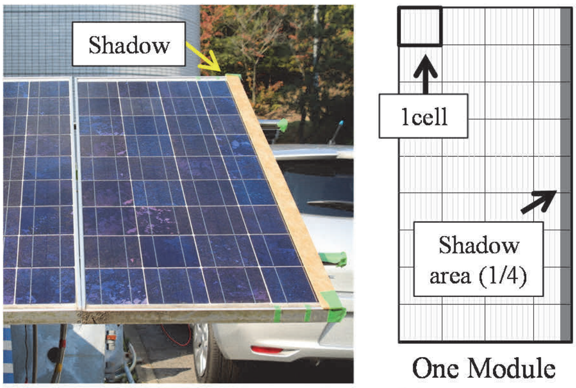
表4　分散型MPPT及び集中型MPPTでの実験装置の仕様

Table 4　Specification of the experimental device in distributed MPPT and centralized type MPPT

		Distributed type	Centralized type
Battery	Type	Lithium-Po battery	Lead storage battery
	Cell Voltage	3.7 V	12 V
	Cell Capacity	5.6 Ah	12 Ah
	Composition	8 parallel - 33 series	4 series
MPPT	Type	Step-UP	Step-Down
	Input Voltage	10-30 V	15-250 V
	Input Power	125 W	500 W
	Weight	52 g	850 g



(a) MPPT configuration of the PV systems.



(b) Shadow area of PV module.

Fig.8　Experiment configuration of PV system

図8　実験でのPVシステムの外観

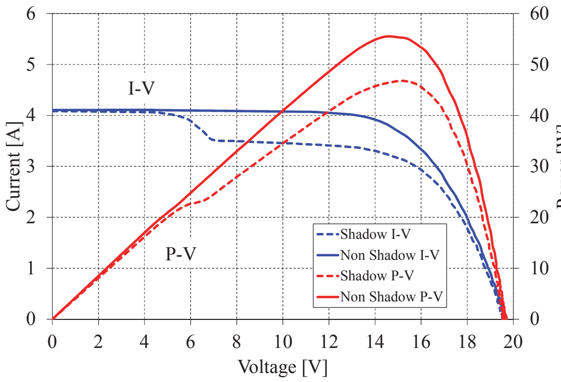
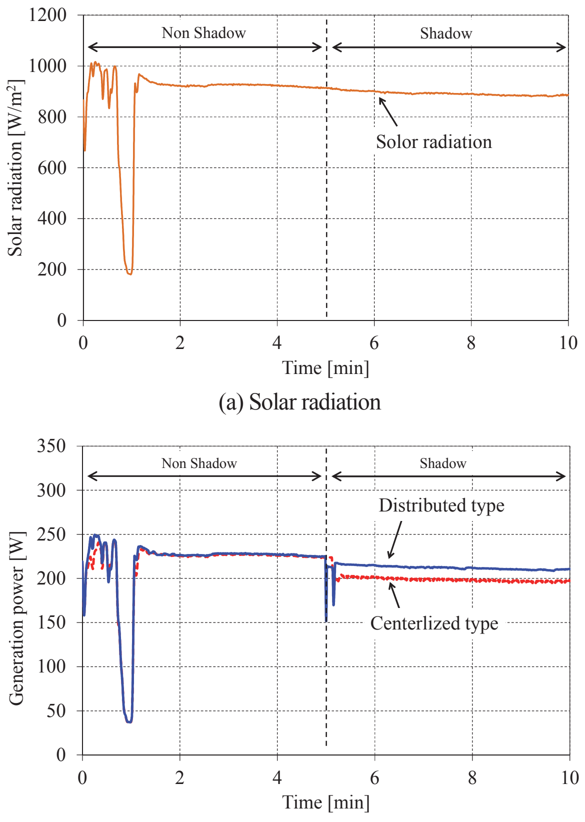


Fig.9　I-V characteristic of 1/4 shadow

図9　1/4部分影でのI-V特性

が変化したことにより最適動作電力が低下したことが分かる．集中型MPPT制御の場合，他のPVモジュールに影が掛かっていない状況であると，部分影が生じたPVモジュールの発電特性に影響され，この部分をバイパスすることで全体の出力低下を防いでいる．

次に，部分影有無による各MPPTシステムでの出力特性を図10に，その発電電力の比較を表5に各々示す．図10において分散型と集中型の各MPPT制御を比較すると，部分影無しから有りとなっても日射量は一定であるものの，部分影有りにより双方のシステム共に若干発電電力が低下し



(a) Solar radiation

(b) Generation power

Fig.10　Output characteristics of each MPPT systems

図10　各MPPTシステムにおける出力特性

表5　分散型及び集中型MPPT制御での発電電力の比較

Table 5　Comparison of the generation power in each MPPT systems

Shadow	Solar radiation	Distributed type system	Centralized type system
No	915.5W/m^2	225.09W	224.28W
Yes	883.3W/m^2	209.71W	196.68W
	Convert at non shadow.	217.36W	203.85W
		-3.44%	-9.11%

ている．低下度合いについて比較するために，表5に示す様に発電電力を部分影無し時を基準日射量として換算し双方の電力を表にまとめた．その結果，部分影の発生により分散型MPPT制御では約3.4%の低下であったが，集中型MPPT制御では約9.1%の低下であった．集中型MPPT制御の場合，PVモジュールの影の掛かった部分はバイパスした状態を最適動作点として出力しており，バイパスされた範囲の発電電力とBDの通電損失である約20.4Wが部分影の影響により低下したと考えられる．分散型MPPT制御では，各PVモジュール単位でMPPT制御を行うため，部分影による発電電力低下分である約7.7Wのみであり，部分影発生により分散型MPPT制御の導入効果が確認できた．

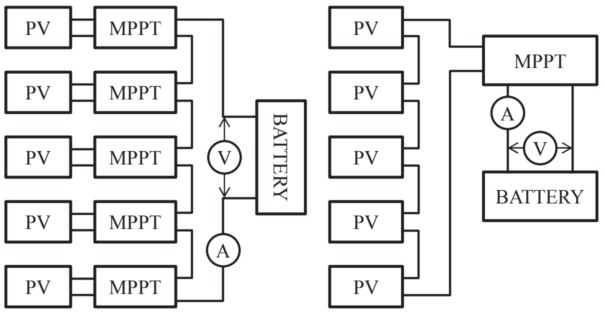
3.3 据置型PVシステムおけるMPPTの比較

次に，前章にて使用したPVシステムを用いて日中の発電電力量の改善効果を確認するために，実フィールドでの実証試験を行った．

図11に本実験におけるシステム回路図を示す．本検討での実験装置は表3であり，基本的な構成は前節の検討と同様である．但し，PVモジュールのストリング数については，MPPTの定格値，蓄電池の電圧範囲を考慮して各々5モジュールで1ストリングを構成することとした．またPVストリングの構成場所は，図3に示す上段右手側5枚を分散型，下段右手側5枚を集中型にて使用した．設置場所の都合上，午前中は樹木の影響でPVアレイに影が掛かるが，PVアレイ上下段の影の比率は同程度であることから本構成で比較した．実験時は，負荷となる各電池の状態を示すSOCは約50%程度に調節し，実験時は日の出から日没までの約12時間において，分散型及び集中型MPPT構成から出力される発電電力を比較した．

本実験での実験結果を図12および表6に各々示す．本実験日は，図12(a)に示す様に日射量が大きく変化する天候であった．この状況下において分散型MPPT制御および集中型MPPT制御での発電電力を比較すると，同図(b)に示す様に，午前中の発電では分散型が240W程度発電している場合でも，集中型では約120Wの発電電力にとどまっている事があり，特に午前11時頃までは差が大きいことが分かる．しかしその反面，午後は部分影の原因となる障害物の影響は少ないことから，双方の発電電力に大きな差は生じておらず，ほぼ同等の出力が得られている．この時の積算電力量を同図(c)にて比較すると，部分影が生じる午前中の発電により電力量の差が大きくなっており，影が生じにくい午後でも多少の改善は見られた．

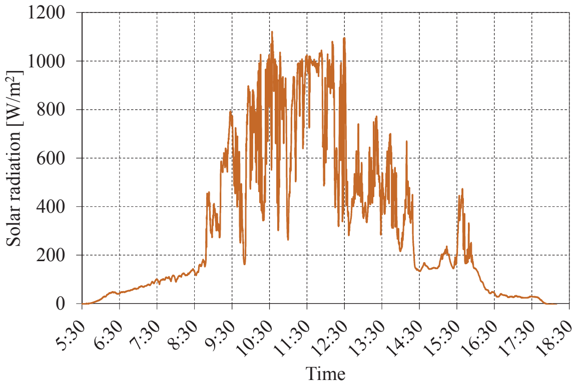
この積算電力量について表6に示すように比較をすると，集中型MPPT制御に対し分散型MPPT制御では，発電電力量が1日で約18%向上することが分かった．また午前及び午後での内訳としては，午前中は約30%，午後では約4.3%の向上であり，影の生じる午前中や均一に日射がかかる事が多い午後でも改善することを確認できた．部分影以外の改善要因としては，経年劣化等により各PVモジュール個々の発電特性に差異が生じたことが考えられる．特に午前中は，その個々の発電特性の差違と部分影の影響により，



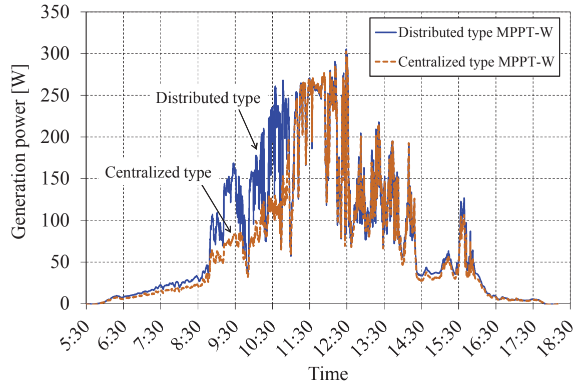
(a) Distributed type　　(b) Centralized type

Fig.11　System configuration

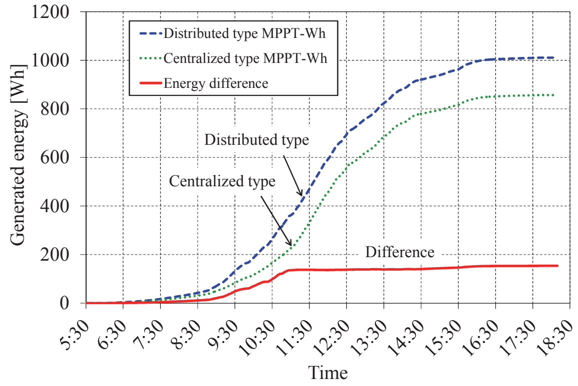
図11　システム構成



(a) Solar radiation



(b) Generation power



(c) Generation power energy

Fig.12　Generation power characteristics of each MPPT's

図12　各MPPT構成における発電特性

表6　積算電力比較

Table 6　Integrated power comparison

		MPPT Type		Difference
		Distributed type	Centralized type	Power [Wh]
Generation Power Energy [Wh]	All Day	1,011.2	857.0	154.3
	Morning	592.9	456.0	136.9
	Afternoon	418.3	401.0	17.4

更に発電電力のばらつきが大きくなったためであると推測される．

以上のことからも，分散型MPPT制御は既存の集中型MPPT制御と比較して効率良く電力が得ることができ，その有効性を確認することができた．

3.4 ソーラーカーにおける分散型MPPT制御

据置型PVシステムにおいて実証実験を行った結果，分散型MPPT制御の有効性が確認できた．そこで，移動体であるソーラーカーに対して分散型MPPT制御を実施した場合について検討を行った．

分散型MPPT制御を導入した車両は，図13に示す800Wの太陽電池を搭載したソーラーカーである．ここで，PVモジュールのパネルレイアウト図を図14に示す．

分散型MPPT制御の有効性を確認するために，ソーラーカーレース鈴鹿2013において，全PVモジュールに対し

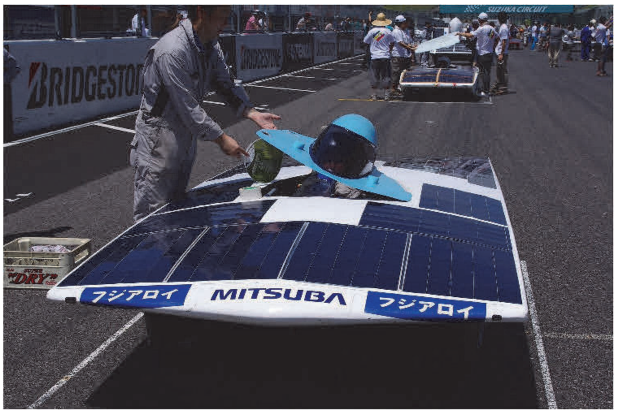


Fig.13　800W Solar Car

図13　800Wソーラーカーの外観図

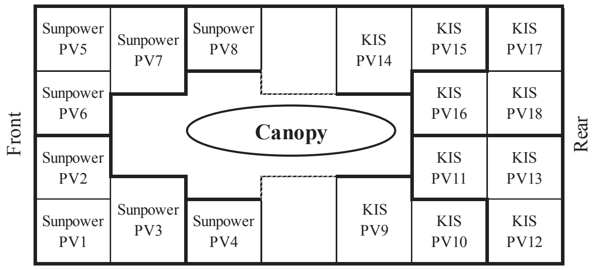
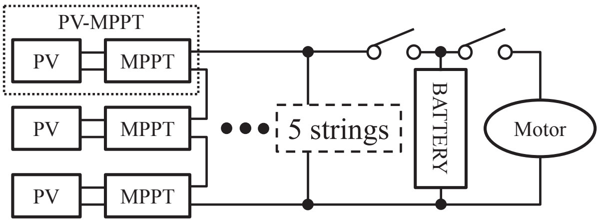
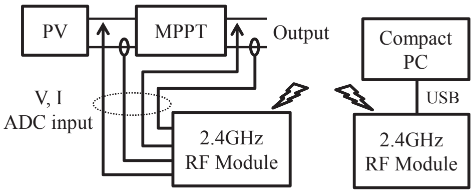


Fig.14　Panel layout of PV module

図14　PVモジュールのパネルレイアウト



(a) Circuit configuration



(b) RF measurement system

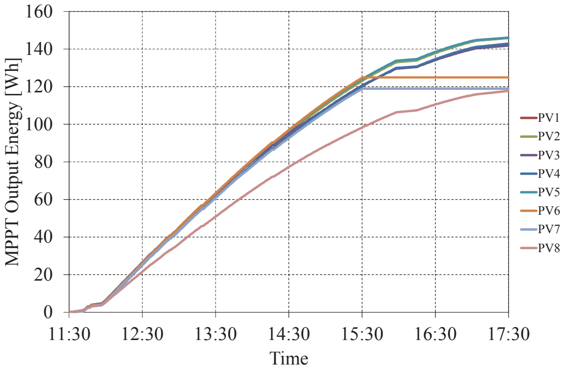
Fig.15　System configuration from solar car

図15　ソーラーカーのシステム構成

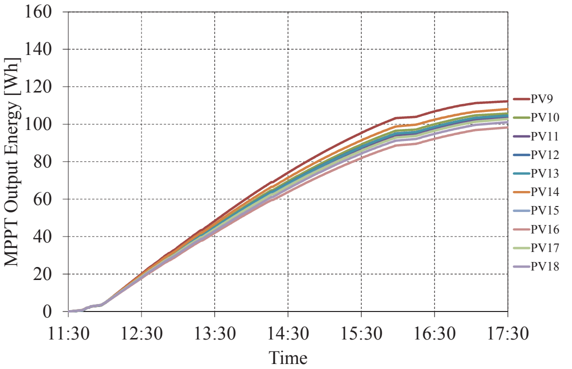
て分散型MPPTモジュールを各々取付けた．このときのシステム構成を図15(a)に示す．システムは，12V鉛蓄電池5直列に対し，放電下限電圧52.5V時に昇圧比1.1となるようPVシステムの設計を実施し，分散型MPPTモジュールを3直列6ストリングスで構成した．ストリング内のPVモジュール構成は，基本的に同一仕様であるが，各枚数の都合から2ストリングスのみ，50W×1モジュール，40W×2モジュール(39.8W及び42.3W)という仕様が異なる3種類の太陽電池モジュールで構成している．また同図(b)に示すように，各MPPTに対して発電状況が測定できるように，2.4GHz帯無線通信による測定装置も同時に取付け，車載した小型PCにてデータを収集した．

鈴鹿5時間レースにおける各太陽電池モジュールの積算発電電力量を図16に示す．同図(a)は車両前方の50W 太陽電池モジュール，同図(b)は40W 太陽電池モジュールのレース中における積算発電電力の推移を各々表している．同図(a)において，PV8の積算値が小さい原因は調査中であるが，PV6及び7において15時30分頃から変化が無いのは，各MPPTに設置した測定装置用蓄電池異常により，データ取得が停止したためである．

各MPPTから出力された積算発電電力の特徴として，フロントのPVモジュールはばらつきが少なく均一に発電できているが，後方10枚のPVモジュールは10%程度のばらつきが生じていることがわかった．前後PVモジュールは使用年数が異なり，ばらつき原因は太陽電池の経年劣化とも考えられるが，空力を考慮したカウルに設置していることからPVモジュールの面角度が5度から8度であり，高さ約160mmのキャノピーの影による発電ばらつきが影響していると考えられる．特に鈴鹿サーキットでは，ホームストレートで1.6度の勾配が付いており，様々な方向，勾配の条件下で走行を行う．このため発電特性は常に変化しており，その影響が10%のばらつきとして見られたものと推測される．集中型MPPT制御では，発電ばらつきが生じた場合でも1点の動作点で追従を行うために，個々の発電特性の差違による影響が大きい．このことからも，ソーラーカーでは分散型MPPT制御が適していることが分かる．



(a) Front PV module (Sunpower×8 Module)

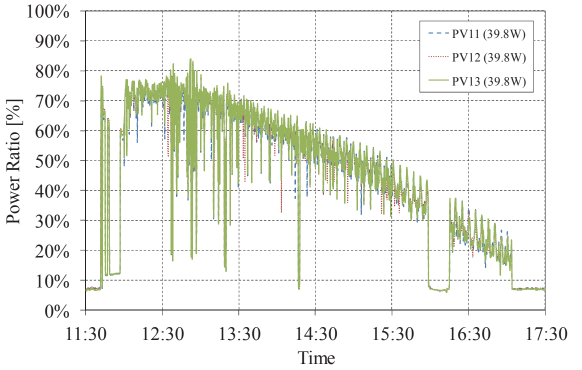


(b) Rear PV module (KIS×10 Module)

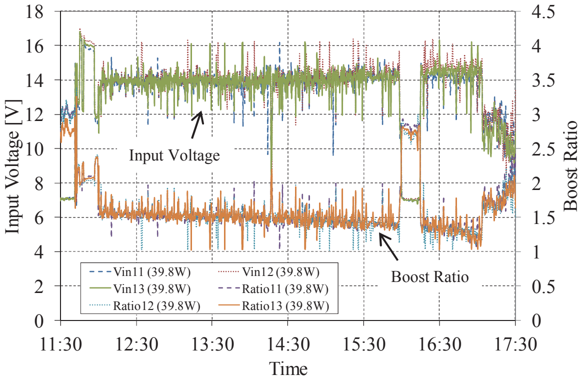
Fig.16 Generated output characteristics of each PV module
図16 各PVモジュールの積算発電電力特性

次に，図17において各PVストリングでの発電特性について検討した．同図(a)及び(b)はストリング内のPVモジュールの発電ばらつきが小さい回路，同図(c)及び(d)はストリング内の構成を異種モジュールで構成し，発電のばらつきが大きい回路での発電特性である．ここで，各グラフにおいて15時40分頃から10分程度発電が停止している原因は，走行中の車両異常による修理によるものである．また各発電電力の特性では，太陽電池モジュールの定格発電電力値に対する実際の発電電力割合を示しており，パーセントにて表している．さらに，ストリング内で発電ばらつきが生じる場合，その発電電力比率で出力電圧が変動することから昇圧比が大きく変化する．このため，一定の比率で発電が変化する場合は昇圧比に変化は発生しない．

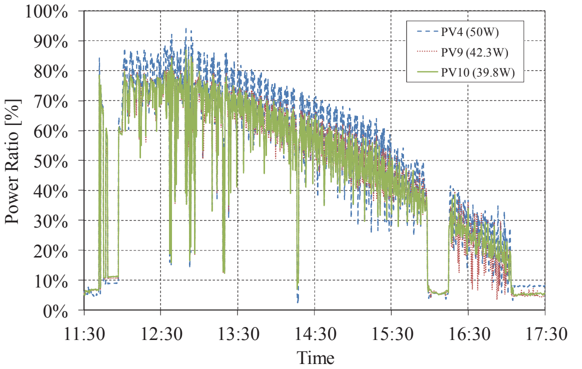
各ストリング構成について比較すると，図17(a)及び(b)では各MPPTから出力される発電電力のばらつきも少なく，昇圧比に大きな変化が無いことが分かる．また，レース開始の12時では各MPPTの昇圧比1.5程度であるが，終了時の17時では均一に1.15程度まで低下している．このことにより，ストリング内のばらつきも少なく良い条件で発電ができたことが確認できる．次に同図(c)及び(d)においては，ストリング構成時の太陽電池モジュール自体の発電特性が異なることでばらつきが生じていることから，前者とは違う特性であることが分かる．ここでこのストリングは，車両中央の傾斜がきつく，キャノピーの横に配置されているものである．同図(d)に着目すると，PV4(50W)の太陽電池モジュールはセルの直列数が少なく，発電電力も大きいことから，他のモジュールと比較して昇圧比が大きいことが分かる．さらに，発電電力においては14時30分頃から大きく発電電力が変動し，同様に昇圧比の変動が大きくなり，16時以降では全体的に顕著であることが分かる．この原因としては，太陽高度の低下でキャノピーによる部分影が発生し，発電のばらつきが発生しているためと想定される．しかし，ストリングに接続される他の太陽電池モジュールの発電電力には大きく影響しておらず，安定した発電が出来ていることが分かる．このことからも，ソーラーカーに対し分散型MPPT制御を導入することで，発電のばらつきの影響を抑えて発電効率の改善に寄与できることができ，その有効性を確認することができた．



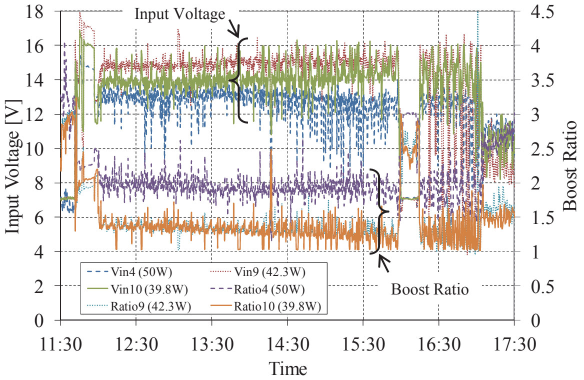
(a) Power with same PV module formation (40W×3 Module)



(b) Voltage and boost ratio with
same PV module formation (40W×3 Module)



(c) Power with different PV module formation
(50W, 42.3W, 40W Module)



(d) Voltage and boost ratio with
different PV module formation (50W, 42.3W, 40W Module)

Fig.17　Generation characteristics of each String
図17　各ストリングの発電特性

4．まとめ

本論文において，PVストリング内の部分影発生による効率改善を目的に，太陽電池モジュール単位でMPPT制御を行う分散型MPPTシステムを開発し，据置型PVシステム及びソーラーカーに対して有効性の検討を行った．

PVストリングのI-V特性上，部分影が発生するとその特性が大きく変化するが，影のかかったPVモジュールをダイオードにてバイパスすることで全体への影響を少なくすることがわかった．しかし部分影が発生し，発電能力が低下したPVモジュールをバイパスすると，その発電電力を有効に得ることが難しく，ダイオードによる損失も発生することを検証した．

実際のフィールド試験においては，午前中に部分影が発生する環境での据置型PVシステムへの検証の結果，分散型MPPT制御の導入により1日で約18%の積算発電電力量の改善を確認した．その効果は，午前中の部分影が多く発生する条件下での改善効果が高いことを確認した．本MPPTは従来と比べ小型軽量，低コストであり，低電圧から動作するため，太陽電池の搭載が制限されるソーラーカーへの適応に最適である．そこで，ソーラーカーに対して分散型MPPTシステムを構築して鈴鹿サーキットにて発電特性の評価を行った．各PVモジュールの積算発電電力で比較すると，各々の発電電力に約10%程度のばらつきがあることが分かった．また走行中の発電特性では，ストリング内で発電ばらつきが生じた場合でも，他のPVモジュールに対して影響を与えることなく発電電力が最適に出力でき，分散型MPPT制御の有効性を確認することが出来た．

現在の分散型MPPTモジュールは昇圧動作のみであるため，極端な発電ばらつきがストリング内で発生すると他のPVモジュールに影響を与えることがある．そこで今後の計画として，大きくばらつきが発生する条件においてストリングの構成を切り替えて制御する手法を考案し，その有効性の検討を行う予定である．

参考文献

(1)　経済産業省資源エネルギー庁：「太陽光発電システム等の普及動向に関する調査」，平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査 (2013/3)
(2)　貞松，川口，峯元，高倉：「分散型MPPTによる太陽光発電システム高効率化に関する研究」，太陽/風力エネルギー講演論文集，151-154 (2012/11)
(3)　小林，磯部，嶋田：「調整コンバータによる太陽光発電の個別MPPT方式の検討」，電気学会全国大会講演論文集，7-067 (2013/3)
(4)　加藤，藤澤：「移動体におけるPVシステム多系統化の評価」，太陽/風力エネルギー講演論文集，501-504 (2010/11)
(5)　木村，池上：「Tokai Challengerの開発とソーラーカーの動向」，太陽/風力エネルギー講演論文集，509-512 (2012/11)
(6)　清水敏久：「太陽電池発電システムの発電動作点制御回路」，FBテクニカルニュース　No.56号（2000. 11. 1）

(7) 折原，藤田，岡崎，武田，木村：「800Wソーラーカー(Tokai S8)の設計及び製作」，ソーラーヴィークルとソーラーバイシクルに関するワークショップ2004，PVB-1 (2004/11)

(8) 盛谷，中川，城ノ口：「太陽光発電システム①…競技用ソーラーカー」，トランジスタ技術2010年3月号

(9) 山下勝巳：「MPPT機能を搭載した昇圧型DC-DCコンバータICをSTMicroが発売，太陽光発電に向ける」，日経テクノロジー (2010/6)

(10) 伊倉，松山：「柏会における車両性能向上の取り組みと分散型MPPTの開発」，日本太陽エネルギー学会ソーラーカー製作講習会(2013/2)

(11) 瀧川，金納，三好，雪田，後藤，一柳：「分散型最大負荷追従制御を用いた発電電力向上に関する検討」，電気学会合同研究会，FTE-13-048 (2013/11)