

# 太陽電池最大出力点追尾装置の開発

滋賀職業能力開発短期大学校

木戸規雄

A Development of Maximum Power Point Tracker for Solar Battery

Norio KIDO

## 要約

太陽電池は、半導体で作られ太陽のエネルギーを電気エネルギーに変換している。これら太陽電池は、ソーラーカー、夜間用道路標識、電卓などの近年身近な電源としてまた、太陽光発電にも用いられている。

この太陽電池から常に効率よく電力を取り出す方法は多く考案されている。大型太陽光発電システムにおいては、太陽電池の最大出力点を追尾する変換器を用い、太陽電池の性能を十分に発揮するシステムとなっているが、比較的小規模電力に利用される太陽光発電システムは、そのコスト的、スペース的なことから、太陽電池が持つ性能を有効に活用した発電システムとなっていない場合が多く見受けられる。

そこで、筆者は、従来のシステムに比べて小型、低コスト化がはかられ、しかも高効率となる太陽光発電システムに用いる最大出力点追尾機能を付加した直流電力変換装置（仮称 MPPT：Maximum Power Point Tracker）を開発し、これについて述べている。

## 1 はじめに

太陽電池は、無公害、無尽蔵なエネルギー源として早くから注目を浴びていたが、コスト高のため本格的な普及には至っていなかった。しかし、太陽電池自体の変換効率のアップやコスト低下は勿論のこと、近年は、地球環境問題を背景として、我々の身近な極小型のシステムから送電が困難な場所や地域における比較的小規模の独立形太陽光発電システムまで利用されるようになってきている。

太陽電池は、日射量(照度)、温度の変化により発生する電力が大幅に変動し、また、電流-電圧特性 (I-V特性)も非線形となる。この不安定な電源からできるだけ多くの電力を取り出すには、その条件下で太陽電池が発電している最大出力点でシステムを動作させる必要がある。

現在の比較的小規模太陽光発電システムでは、日射量が低下し、あるいは温度が上昇した場合について、最悪の条件を想定し、太陽電池や蓄電池の仕様を決定しているので良好な条件下においては過剰な仕様となっている場合がある。

この過剰な仕様を軽減するためには、時々刻々と変化する条件下において太陽電池の持つ性能を有効に引き出すよう最大出力点を追尾する必要がある。

この最大出力点追尾装置は、大電力太陽光発電システムにおいて、既に確立された技術であり、その制御系は高い信頼性と高効率化のために複雑なものとなっている。このため、小電力発電システムに最大出力点追尾制御を導入することは、コスト高となり、また、制御装置を格納するためのスペースが必要となり実用化されていないのが現状である。

そこで筆者は、この小電力太陽光発電システムに用いる最大出力点追尾機能を付加した高効率、小型でかつ低コストの直流電力変換装置を開発した。

本論文では、筆者の開発した MPPT をソーラーカーに搭載した太陽電池の最大出力点追尾装置として用い、ソーラーカーレースに出場しながらその評価も行っている。

## II 最大出力点追尾の概要

### 1 最大出力点追尾制御の概要

太陽電池の最大出力点とは、太陽電池を電源として使用した場合の出力電流（動作電流）と出力電圧（動作電圧）の積が最大になる点で、この時の動作電圧を最大出力動作電圧  $V_{pm}$ 、動作電流を最大出力動作電流  $I_{pm}$  とおくと最大出力電力  $P_m$  は、次式で求められる。

$$P_m = V_{pm} \times I_{pm} \quad (W)$$

$V_{pm}$  と  $I_{pm}$  は、短絡電流  $I_{sc}$  や開放電圧  $V_{oc}$  と同様に照度や温度に依存し、それらの依存性や仕様<sup>(1)</sup> は、太陽電池メーカーから示されている。

また、太陽電池は、定電流源であるため動作電圧が最大出力動作電圧  $V_{pm}$  となっているならば、動作電流は、図1に示すように最大出力動作電流  $I_{pm}$  となり、最大出力電力  $P_m$  が得られることになる。

本法は、I-V特性と最大出力動作電圧との交点が最大出力点であることに着目し、太陽電池の照度や温度に変化が生じて、動作電圧が常に上式の最大出力動作電圧  $V_{pm}$  と等しくなるように制御をすることで太陽電池の最大出力点追尾を行なっている。

図2を用い、本法による照度が低下した場合の最大出力点追尾について述べる。

図2の  $P_m$ 、A点、B点は、動作点でI-V特性と負荷線の交点で示している。

図2の負荷線は、太陽電池の負荷インピーダンス  $Z$  から求められる傾き  $1/Z$  の直線であり、負荷インピーダンス  $Z$  の大きさにより傾きを変化させることができる。

$W_1$ なる照度を受けて、最大出力点  $P_m$  で動作して

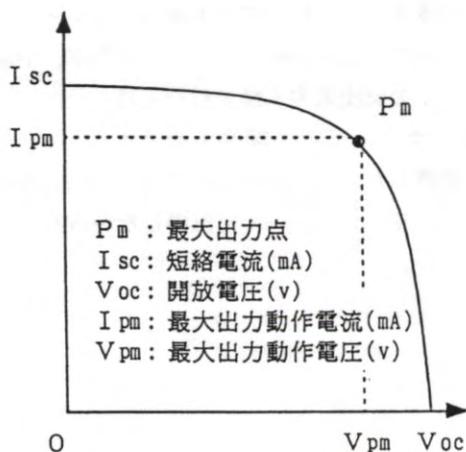


図1 I-V特性と最大出力点

いる太陽電池の照度が低下し、I-V特性が  $W_1$  から  $W_2$  に変化したとすると、動作点は  $P_m$  から  $W_2$  と負荷線の交点であるA点に移り、動作電圧は、 $V_{pm}$  から  $V_{op}$  に変化する。

このような場合は、 $V_{pm}$  の垂直延長線と  $W_2$  との交点である最大出力点B点まで動作点を移動させ、動作電圧  $V_{op}$  を最大出力動作電圧  $V_{pm}$  と等しくすることで最大出力電力を得ることができる。つまり、負荷インピーダンス  $Z$  を大きくし、 $V_{op}$  を照度  $W_2$  の最大出力動作電圧  $V_{pm}$  とすることで最大出力点追尾が行えることを示している。

つぎに、図3を用い太陽電池の照度一定で温度が上

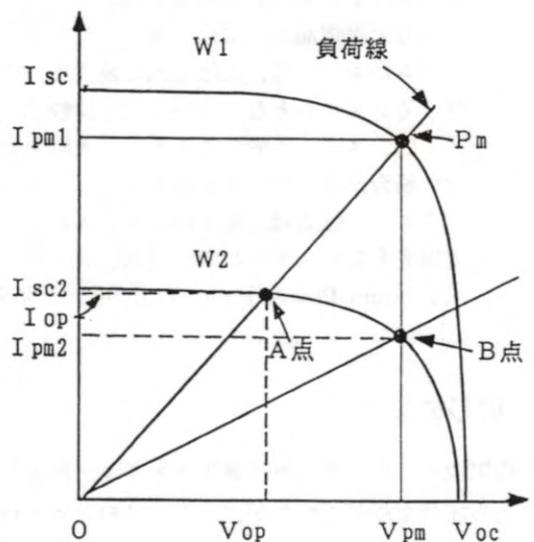


図2 照度が低下した場合の動作点

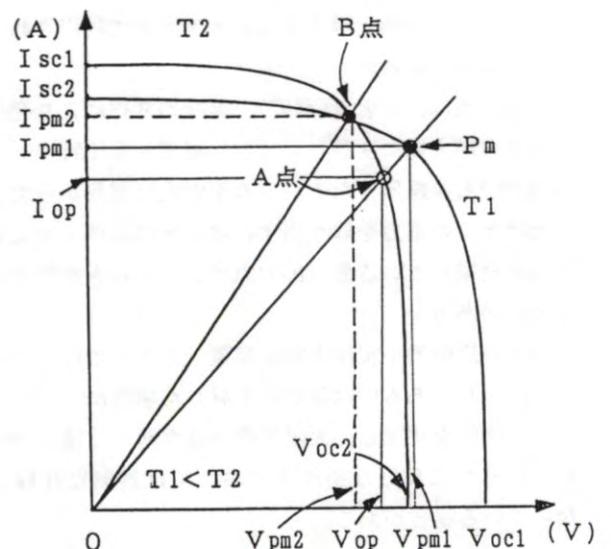


図3 温度が上昇した場合の動作点

昇した場合の最大出力点追尾について述べる。

開放電圧  $V_{oc}$  は、図2から明らかなように照度に変化してもほとんど変化はしないが、温度が上昇した場合には、 $V_{oc1}$ から  $V_{oc2}$ まで低下し、 $V_{pm}$ も  $V_{oc}$ と同様に  $V_{pm1}$ から  $V_{pm2}$ まで低下する。

温度  $T1$ の最大出力点  $P_m$  で動作している太陽電池の温度が  $T2$ に変化したとすると温度  $T1$ での動作点  $P_m$  は、負荷線と  $I-V$ 特性 ( $T2$ )との交点  $A$ 点に移動し、動作電圧は、 $V_{pm1}$ から  $V_{op}$ に変化する。このような場合は、太陽電池の温度  $T2$ における最大出力動作電圧  $V_{pm2}$ の垂直延長線と  $I-V$ 特性 ( $T2$ )との交点  $B$ 点まで動作点を移動させ、動作電圧  $V_{op}$ が最大出力動作電圧  $V_{pm}$ と等しくすることで最大出力電力を得ることができる。つまり、負荷インピーダンス  $Z$ を小さくし、 $V_{op}$ を温度  $T2$ での最大出力動作電圧  $V_{pm2}$ と等しくすることで最大出力点追尾が行えることを示している。

このように本法は、太陽電池の各温度で補償された最大出力動作電圧  $V_{pm}$ を求め、これの一定制御を行うことで最大出力点追尾を可能にしている。

## 2 最大出力点追尾装置の概要

図4は各種条件下において、(太陽電池の動作電圧  $V_{op}$ )=(太陽電池の最大出力動作電圧  $V_{pm}$ )となるような  $V_{op}$ 一定制御方式を採用した最大出力点追尾装置 (Maximum Power Point Tracker) の回路構成である。

MPPTは、温度補償回路、比較器1 (CMP1)、比較器2 (CMP2)、モード切換器、PWMコンパレータからなる制御部と電力変換部であるDC-DCコンバータ

から構成している。

温度補償回路は、太陽電池の温度に応じた  $V_{pm}$ の補償信号を出力させる回路であり、本法を用いた最大出力点追尾を行う場合には、 $V_{pm}$ の温度補償及び温度と補償信号との関係で表す温度補償特性が重要となる。これについて筆者は、仕様条件から太陽電池のメーカーが示す  $V_{pm}$ の温度に対する変化率、約  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}/\text{Cell}$  ( $0.435\%/^\circ\text{C}/\text{Cell}$ )で補償を行い、温度補償法は、サーミスタを使用した温度センサによって太陽電池の温度を検出し、精密可変シャントレギュレータを応用した温度補償回路の出力電圧信号(補償信号)  $V_{ref}$ を用いることで行っている。

温度補償回路は、 $V_{pm}$ が約  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}/\text{Cell}$ で線形に変化するのに対して、温度センサとして用いるサーミスタの温度-抵抗特性は非線形を示す。そこで、実測結果から考慮した太陽電池の使用温度領域となる  $20^\circ\text{C}$ から  $80^\circ\text{C}$ の範囲を低温を  $20^\circ\text{C}$ 、中温を  $50^\circ\text{C}$ 、高温を  $80^\circ\text{C}$ の3点で線形化し、太陽電池の最大出力動作電圧  $V_{pm}$ に比例した温度補償信号  $V_{ref1}$ が得られるように動作させている。

図5は、本法で用いた温度補償特性であり、太陽電池の温度の変化に対する温度補償回路の出力信号  $V_{ref}$ の値を示している。

比較器1 (CMP1)は、 $V_{op}$ 一定制御を行わせるために太陽電池の動作電圧と温度補償信号 ( $V_{ref1}$ )とを比較し、その差をモード切換器に inputs する回路である。

比較器2 (CMP2)は、負荷に対する過電圧保護を目的とし、追尾装置の出力一定制御を行わせるための基準電圧 ( $V_{ref2}$ )とDC-DCコンバータの出力電圧とを比較し、その差をモード切換器に inputs する回路である。

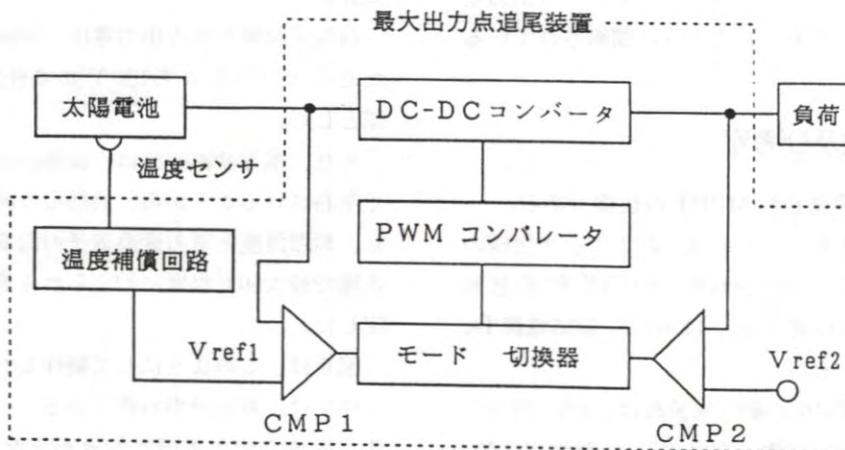


図4  $V_{op}$ 一定制御方式による最大出力点追尾装置の回路構成

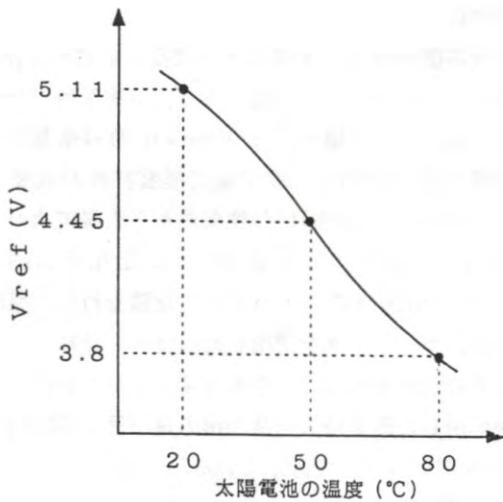


図5 温度補償特性

モード切替器は、太陽電池の発電電力及び負荷への供給電力等の状況によりCMP1もしくはCMP2の何れかからの出力を選択し、その出力信号をPWMコンパレータに入力するように動作をしている。

PWMコンパレータは、モード切替で選択された信号でパルス幅変調し、その出力をDC-DCコンバータの制御パルス信号として出力している。

DC-DCコンバータは、PWMコンパレータでパルス幅変調された制御パルス信号により電力変換素子のオンデューティ比を変化させ、入力インピーダンス(太陽電池からみた負荷インピーダンスZ)が変化するよう動作している。

開発したMPPTは、回路の動作から明らかなように、二つの制御動作(制御モード)をもち、発電システムの動作状態によって太陽電池の最大出力点追尾を行う入力電圧一定モード(Vop一定制御)及び負荷に対する過電圧保護を行う出力電圧一定モード(出力電圧一定制御)の何れをもとれるように制御されている直流変換器である。

### III 製作・試験及び考察

表1は、筆者が開発したMPPTの仕様である。

本MPPTの太陽電池パネルは、表2に示す仕様の太陽電池モジュールを10枚を直列(360Cell直列)接続で使用しており、開放電圧Vocは207V、短絡電流Iscは1.5Aとなっている。

本MPPTの制御回路の動作周波数は、小型、軽量化のために200KHZとし、電力変換素子は、動作周波数、スイッチング損失を考慮し、パワーMOSFETを用いた。

制御回路電源は、入力電圧の変動に対して安定した出力電圧を得るためRCC(Ringing Choke Con-

表1 MPPTの仕様

追尾方式	温度補償付き、太陽電池出力一定制御
制御方式及び動作周波数	PWM制御による降圧型チョップ動作周波数 200 KHZ
入力電圧・電流範囲	80~250 V MAX 2 A
出力電圧・電流範囲	60~150 V MAX 4 A
電力変換素子	パワーMOSFET
制御回路電源	RCC方式
変換効率	96.32%
保護回路	出力電圧・電流一定制御及び素子加熱防止回路 逆接続及び逆流防止回路
外形寸法・重量	L180×W140×H70 640 g

表2 太陽電池モジュールの仕様

	電力, 電圧, 電流	温度係数 (%/°C)
最大出力 Pm(w)	22.2	約-0.51
最大出力動作電圧 Vm(v)	16.56	-0.435%/°C/cell
最大出力動作電流 Im(A)	1.34	
開放電圧 Voc(v)	20.70	約-0.377
開放電流 Isc(A)	1.50	約+0.0505

verter)方式で構成し、これに使用するトランスも小型、軽量化するよう設計し製作した。

過電流保護を目的とした出力電流一定制御は、効率よく負荷に電力供給できるように垂下特性をもたせた。

素子の加熱防止回路には、ヒステリシス特性をもつサーマルガード素子を採用し、冷却後再起動するように設計した。

過電圧保護である出力電圧一定制御は、汎用性をもたせるよう60Vから150Vまで任意に設定できる仕様とした。

また、電力変換回路は、放熱設計により性能が大きく左右されることから、放熱板は試作、実験を繰り返して、周囲温度と電力変換素子の温度差(ΔT)を無風状態で最大50°C程度に抑えられる最少面積で形状を決定した。

図6は、このようにして製作したMPPTである。

図7は、変換効率特性である。この特性は、太陽電池を直流安定化電源におきかえた図8の測定回路によって求めた。

図8のAI、VI、AO、VOは、各々MPPTの入力電

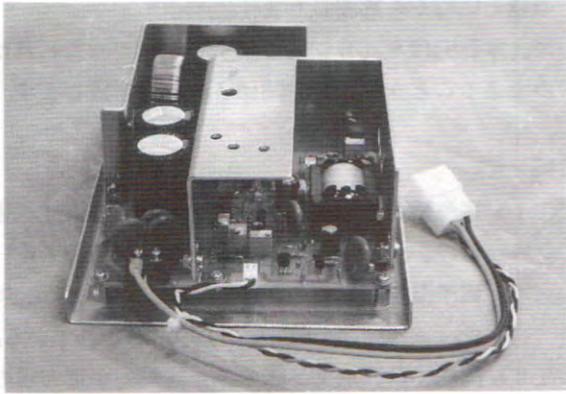


図6 開発したMPPTの外観

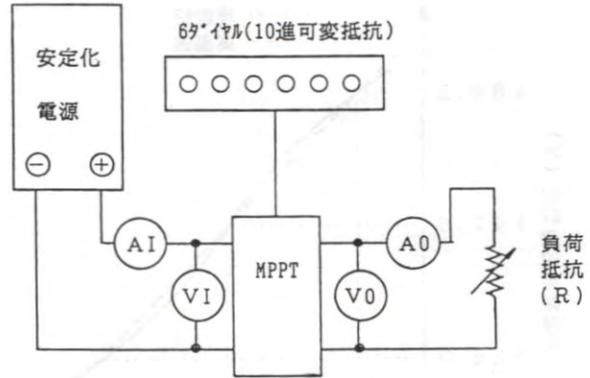


図8 測定回路

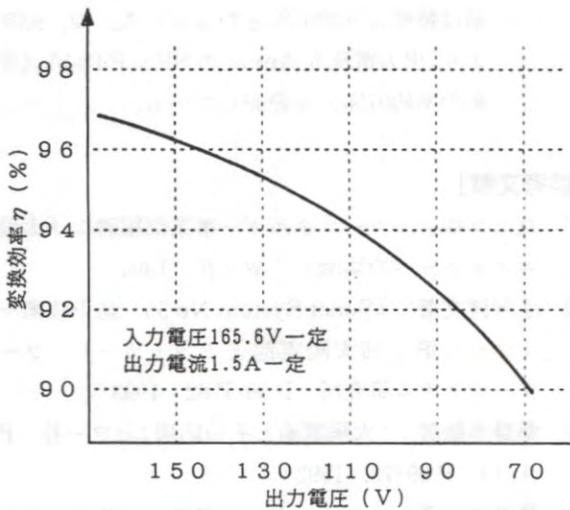


図7 変換効率特性

流、入力電圧、出力電流、出力電圧を示している。

変換効率特性は、MPPTの入力電圧165.6V、入力電流1.5A一定とし、負荷抵抗Rを変化させ出力電圧を60V~150Vの範囲で変化させた時のVOとAOの測定値の積(出力電力)とVIとAIの積(入力電力)の比で求めた結果を変換効率(%)として表している。

また、追尾特性は、MPPTを入力電圧一定モード(太陽電池のVop一定制御)で動作させ、太陽電池の温度に対応したサーミスタの抵抗値を10進可変抵抗に設定し、その時のVIの値を太陽電池動作電圧として表している。

変換効率は、図7から明らかなように90%以上の効率が得られている。例えば、出力電圧150V、出力電流1.6Aでの変換効率は96.32%でありメーカの参考機種<sup>(註2)</sup>と同等以上の高効率を達成している。

本MPPTの電力損失を求めると、全損失の約93%がDC-DCコンバータからなる電力変換部で生じ、残

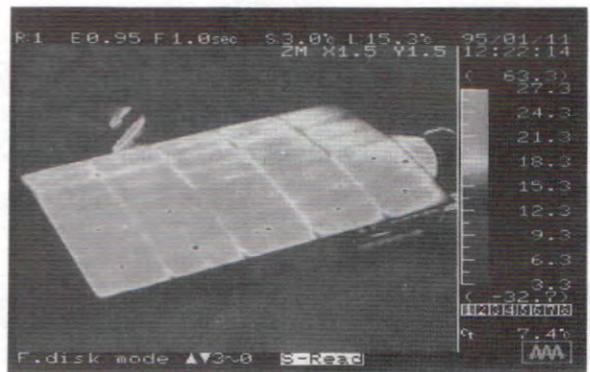


図9 太陽電池パネルの温度分布

りの約7%がモード切換器やPWMコンバータからなる制御部で生じている。これよりさらに効率を上げるためには、電力変換部で発生する定常損失と過渡損失を如何に抑えるかが重要な課題となる。

太陽電池パネルは、444.4Wの太陽電池を222.2W毎の2系統に分割し、それぞれに温度センサとMPPTを設置して、各系統での最大出力点を追尾させた。

図9は、太陽電池パネル表面の温度を水平7万LX、垂直14万LX、気温10℃、平均風速1.5mの条件下での高感度赤外線放射温度計による測定結果である。これから明らかなように、表面温度にはほとんど差がなく均一とみなすことができる。これにより、Vop一定制御方式としても差しつかえないことが確認される。

図10は、図8の測定回路で太陽電池の温度を10℃から90℃まで5℃間隔で上昇させた時の追尾特性結果である。実線が実測値である。破線が、太陽電池の最大出力動作電圧Vpmの温度係数0.435%/℃/Cellより算出した値で理論値である。これより20℃~80℃における理論値に対する実測値の誤差は、最大0.693%であった。

なお、MPPTの耐久性・信頼性については、これを

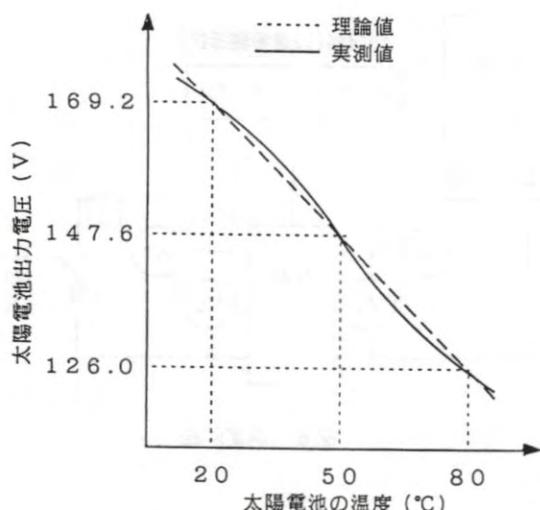


図10 追尾特性

用いたレース、ラリーの出場も含め、約200時間以上の試験を行っているが、現在のところ何等、問題点は現れていない。〈付録参照〉

#### IV まとめ

本論文では、太陽電池最大出力点追尾装置について述べた。まとめると以下のとおりである。

- (1) 温度補償した太陽電池の最大出力動作電圧と太陽電池の動作電圧が常に等しくなるよう制御すること（温度補償による  $V_{op}$  一定制御）で太陽電池の最大出力点追尾が可能となった。
- (2) 太陽電池の  $V_{op}$  一定制御方式は、計算機制御を必要とせず直流電力変換器を応用した簡単な回路で構成できることから、高効率でしかも小型、低コスト化が可能となっている。
- (3) ソーラーカーに開発した MPPT を搭載し、厳しい条件下での評価試験を実施しているが、現在のところ安定した動作を示している。このことは、ソーラーカーだけでなく送電が困難な場所等々での電源として使用されている比較的小規模の独立形太陽光発電システムにも十分対応できると考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり、貴重な助言を下された京セラ株式会社ソーラーエネルギー事業部商品開発課開発1係責任者 小谷野 俊秀氏に謝意を表します。また、卒業研究で種々の実験を行って戴いた、電子技術科平成5年度卒業生上原淳一（現東レエンジニアリング株式会社）、平成6年度卒業生斉川公一（現株式会社栗田製作所）両君並びに本短大の職員の皆さま

の協力に心から感謝致します。

尚、本研究は平成6年度の指定研究により行われたものであることを付記し、関係各位に感謝致します

#### [注]

- (注1) 電気出力特性で示されている場合もあり、通常は、AM 1.5、入射エネルギー  $1 \text{ Kw/m}^2$ 、素子温度  $25^\circ\text{C}$  での  $V_{oc}$ 、 $V_{pm}$ 、 $I_{sc}$ 、 $I_{pm}$ 、モジュール効率（変換効率）等が示されている。
- (注2) 国内では、京セラ株のみが比較的小電力用の MPPT を製品化しソーラーカーチームに供給している。SRS-PT03A は、本稿で開発した MPPT の仕様に近い機種であり、変換効率は特性より約95%となっている。尚、93年より、出力電流  $6 \text{ Amax}$  の SRS-PT06A、（変換効率約97%）を発売している。

#### [参考文献]

- (1) 京セラ株ソーラーエネルギー事業部編著：「太陽エネルギーへの挑戦」 清文社 1994
- (2) 手塚博文著：「Sonet System No 55 誌上技術セミナー 第2回太陽電池とトラック」 ソーラーシステム研究所 P 55-P 62 1993
- (3) 桑野幸徳著：「太陽電池とその応用」パワー社 P 9-14, P 69-73, 1992
- (4) 原田耕介著：「スイッチング電源ハンドブック」 日刊工業 P 25-149 1993
- (5) 津田 泉、他：「独立形太陽光発電システムにおける太陽電池の I-V 特性の影響」電学論 113巻 7号 P 174 1993
- (6) 梅田 他：「太陽発電システムの最大電力制御」電学会全大 (S. 5) P 147 1993
- (7) 千住智信：「ファジー制御における太陽電池の最大出力追従制御」電学論 133巻 No 8 1993

#### 〈付録〉

本 MPPT を搭載したソーラーカーのレース出場歴および成績

- |        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| H 6・7  | びわこソーラーカーフェスティバル'94      |     |
|        | 学生480 W 以下クラス            | 第2位 |
|        | 学生総合                     | 第3位 |
| H 6・10 | 朝日ナゴヤTVソーラーカーラリー-in名古屋大会 |     |
|        | 学生480 W 以下クラス            | 優勝  |
| H 7・5  | 朝日ソーラーカーレース in TIサーキット   |     |

英田（岡山）

一般480 W 以下クラス	第2位
学生480 W 以下クラス	第3位

（480 W 以下クラスとは、搭載している太陽電池の容量を示す。）