

太陽追尾装置による太陽光発電システムの 発電量の比較

Comparative Performance Analysis of a Photovoltaic System using a Sun Tracker

田中 芳夫^{*1}

Yoshio TANAKA

田中正人^{*2}

Masato TANAKA

住友 敬^{*2}

Takashi SUMITOMO

Abstract

A 47kW photovoltaic pilot plant and an equatorial sun tracking system were designed and installed on the rooftop of the building of the Shikoku National Industrial Research Institute at Takamatsu city. The sun tracker, which mounted a flat plate nonconcentrating solar module with dimensions 1.29m x 0.43m and a pyrheliometer, was controlled by sequence program based on the solar zenith angle data. Also, the tracker could be controlled by other programs, such as the simple tracking mode by which the angle of direction was only changed at noon or changed at every 3-hour. The tracking mode was changed every 2 weeks, and the measurements were performed daily for one complete year.

From the viewpoint of the comparative performance analysis, the measurements for the power, temperature of solar module and total solar irradiance are evaluated by using the sun tracking system. The simple tracking method by which the angle of direction is only changed at noon yields about 20% energetic advantage relative to conventional stationary construction.

Key words : photovoltaic, solar module, sun tracker, simple tracking method, pyrheliometer, energetic advantage

1. はじめに

太陽光発電システムは無尽蔵で環境への負荷の小さい再生可能エネルギー源の1つとして、近い将来の大幅な普及が期待されている。また、平成6年度より始まった住宅用太陽光発電システムモニター事業による補助金制度など、太陽光発電システムの普及促進とそれによるコスト引き下げのための各種方策が検討実施されている⁽¹⁾⁽²⁾。筆者らの研究所でも研究所の移転を契機として、実験棟の屋上に系統連系した47kW太陽光発電システムを導入した。従来、地上設置型やビル屋上などの平屋根設置型の場合、太陽電池アレイの設置角度は年間積算日射量が最大となる年間最適傾斜角(高松市の場合29.5°)⁽³⁾に設定するのに対し、本システムでは三階屋上に設置したため風負荷による建設コスト⁽⁴⁾等を考慮して低角度(10°)に設定されている。

本報告では、風負荷を考慮して従来より低角度で設置されたビル屋上などの平屋根設置型の太陽光発電システムの発電電力量を、太陽追尾装置を利用して収集した各種追尾方式の約2年間の実測データに基づいて

比較検討した結果について述べる。これまで、追尾方式は集光型の電池モジュールにより直達光のみを集光して利用する方式とされ、日本のように年間全日射量に占める直達光の割合の小さい地域では、追尾による効果よりそれに要するエネルギーや費用がシステムの実用性を圧迫する可能性が高いため不適とされてきた。このため、長期間の実測データに基づいた非集光型の電池モジュールを追尾した場合の電力増加効果の検討はあまり行われていないようである⁽⁵⁻⁷⁾。

また、長期間にわたる完全な最大電力追従制御(以下の記述においては P_{max} 制御とする)を行いつつデータの収集は困難であるため⁽⁸⁾、 P_{max} 制御時の1年以上の長期間の実測データによる検討もあまり行われていないようである。したがって、本報告では特に1日に数回のみ時角(方位角)を変更する簡易追尾や正午に1回のみ時角を変更する簡易追尾等について、 P_{max} 制御を行いつつ収集した発電電力等の実測データにより、その有効性の検討を行った。

2. 計測システム

2.1 太陽追尾装置

試作した太陽追尾システムは、非集光型の単結晶シリコン型太陽電池モジュール1枚(標準時最大出力

*原稿受付 平成9年5月21日

*1会員 四国工業技術研究所(〒761-03 高松市林町2217-14)

*2非会員 同上

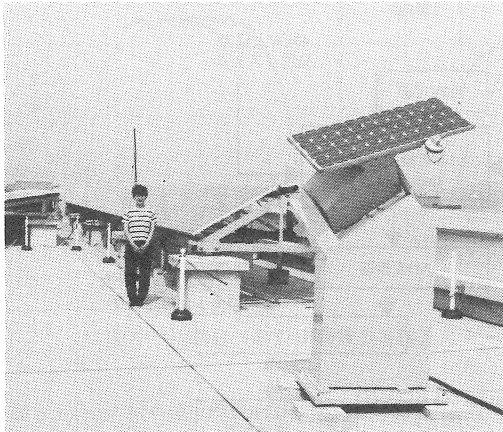


図1 47kW太陽光発電システムと太陽追尾装置

66W, 重量7.8kg)と全天日射量計(英弘精機製MS-801)を搭載し、シーケンサープログラムにより開ループ制御で赤道儀型の2軸追尾を行う時間追尾システムである。図1に屋上に設置された47kW太陽光発電システムと太陽追尾装置の外観を、表1に搭載した太陽電池モジュールの仕様を示す。追尾装置の対比システムとして、南中方向で47kW太陽光発電システムと同じ傾斜角(10°), 高さに固定した架台を設置し、追尾装置と同じ仕様の太陽電池モジュール1枚と全天日射量計を搭載して計測を行っている。なお、追尾システムは外部電源によって動作する非自立型である。

プログラムされた追尾モードは、あらかじめ計算された太陽軌道データにより追尾精度1°以内で終日、連続追尾を行う完全追尾の他、1日に数回だけ決められた標準時に時角を変更する簡易追尾など数種類を有している。図2は太陽追尾装置の簡易追尾モードの動作シーケンス例である。例えば、図2(c)の午前午後時角変更モードでは正午を境に時角を図2(a)の9時の時角から15時の時角へ変更(あるいは10時の時角から14時の時角へ変更)し、日没後の20時に翌日の日の出位置へ復帰するという動作を行う。なお、簡易追尾モードの場合も機構上、仰角調整(赤緯追尾)は常時行われる構成になっている。

2.2 自動計測システム

太陽電池モジュールの直流出力(電圧, 電流, 電力)

表1 追尾装置搭載太陽電池モジュールの仕様

素子	単結晶シリコン
最大出力 [W]	66.0
短絡電流 I_{sc} [A]	3.12
開放電圧 V_{oc} [V]	27.8
最適動作電流 I_{op} [A]	2.89
最適動作電圧 V_{op} [V]	22.8
変換効率 [%]	11.9

標準時発電特性 (AM-1.5, 素子温度 28℃, 太陽入射エネルギー密度 1.0kW/m²)による

は、試作開発した電力測定装置のマイコンによって最適動作点を山登り制御法で追尾するPmax制御を100ms周期で行いつつ測定される。これら直流側計測データは、RS232Cで計測用パソコン(NEC PC9801BX2)へ通信する。また、T型熱電対で測定したモジュール温度(裏面温度)と全天日射量計の出力はAD変換をしてパソコンに取り込む。以上、追尾装置と対比システムである10°固定のモジュール1枚からの計測データ(電圧, 電流, 電力, モジュール温度, 全天日射量)は、MS-DOSのタイマー割り込み機能を利用してパソコンにより5時から20時まで1秒毎のサンプリングで1分間の平均値がディスクに保存される。なお、計測はすべて標準時をもとに行われている。図3にデータ自動計測システムの構成を示す。

2.3 47kW大型太陽光発電システムの概要⁽⁹⁾

本システムは風負荷による架台の建設コスト、夏場における電力需要のピークカット効果等を考慮して、高松地区の年間最適傾斜角より低角度の10°南中方向の設置を主体とした系統連系システムである。また、47kWの太陽電池設置容量に対して、20kW級インバータを2台(A系, B系とする)設置し、各々独立運転するシステムとなっている。モジュール間のばらつきがあってもアレイ出力としてのばらつきの平均化がはかれることと一部のアレイ表面に影が生じてアレイ全体の出力低下を少なくできることから、A系は10°固定360枚, B系は10°固定252枚と30°固定108枚の太陽電池(表1と同様仕様)をサブアレイ方式で結線している。

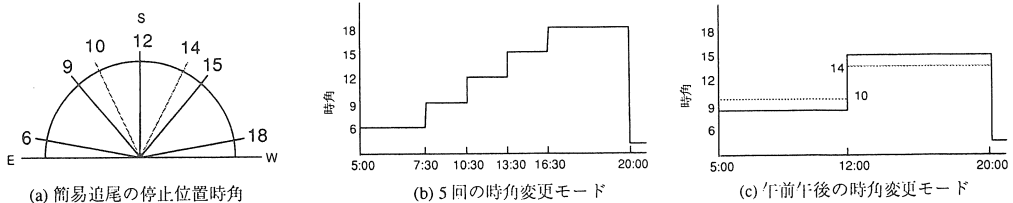


図2 太陽追尾装置の簡易追尾モードの動作シーケンス例

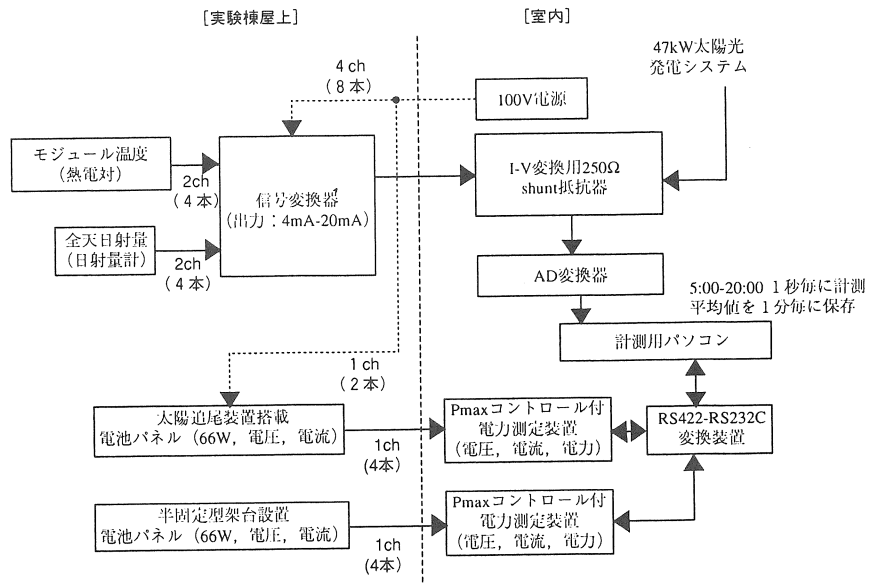


図3 データ自動計測システムの構成

3. 計測実験と収集データ例

データの収集は1994年11月から1997年1月の約2年間実施した。追尾装置は1994年11月から1995年12月までを完全追尾モードとし、1996年1月以降は①完全追尾モード、②1日5回の時角変更(図2(b))、③午前は10時の時角、午後は14時の時角という午前午後の時角変更(図2(c))の3つの追尾モードを2週間毎に変更して、データの収集を行った。

図4は冬の快晴日における完全追尾時のデータ例である。動作電圧はモジュール温度の上昇する正午を中心にした凹型をしており、モジュール温度の低い10°固定のモジュールの方が若干高い値になっている。これらのことから電力測定装置のPmax制御が適切に動作していることが確認できる。また、11時から12時にかけて風の影響と思われるモジュール温度の低下に伴い発電電力が急激に2W程度増加している。このことからPmax制御が適切に動作して測定が行われていることがわかる。図5は夏の曇天日における午前午後の時角変更の簡易追尾時のデータ例である。雲により直達光が遮られるため、全方位からの散乱光をより獲得しやすい姿勢である10°固定の方が追尾より若干多い電力を発電している。

春期は対比システムである10°固定の全天日射量が高松地区の年間最適傾斜角である30°傾斜面全天日射量にはほぼ等しく、晴天時の南中時において追尾システムと対比システムの電力がほぼ等しくなる。図6はこのような春の快晴日における各種追尾モードごとの典型的なモジュール1枚の発電電力波形を示している。

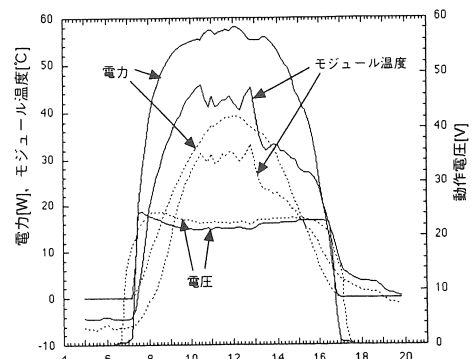


図4 冬の快晴日[1996年1月2日]における完全追尾時のデータ例[実線: 追尾, 点線: 10° 固定]

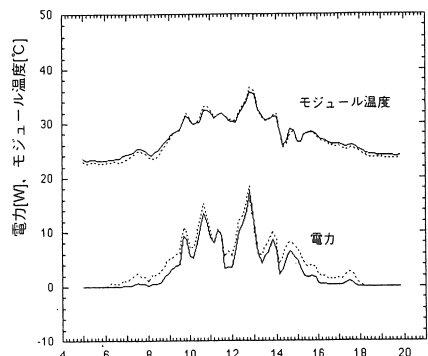


図5 夏の曇天日[1996年8月24日]における午前午後の時角変更の簡易追尾時のデータ例[実線: 追尾, 点線: 10° 固定]

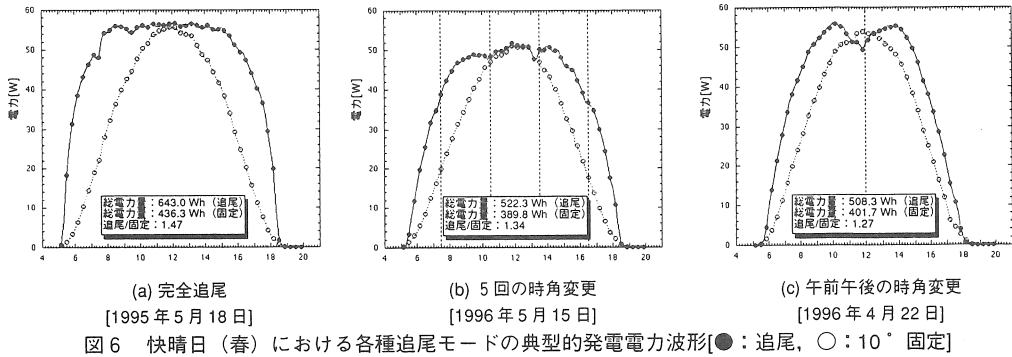


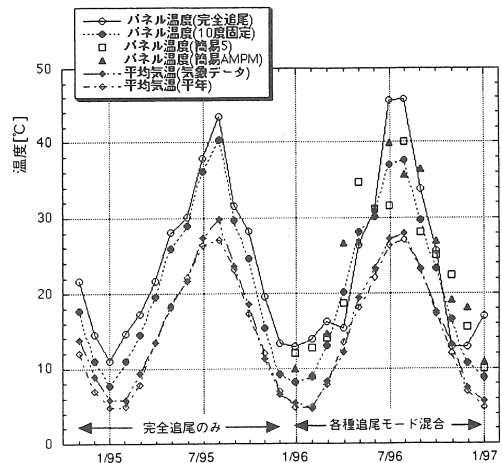
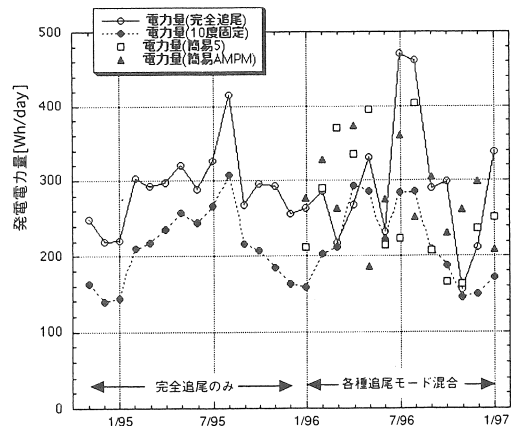
図6(b),(c)の縦点線は時角を切り換えた時刻を示している。図6の波形の数値積分により、固定型に対して追尾方式は(a)完全追尾1.47倍、(b)5回の時角変更1.34倍、(c)午前午後の時角変更1.27倍の電力量が得られることがわかる。非集光型の太陽電池モジュールの場合、完全追尾を行っても1.5倍程度の電力量の増加しかないのに対して、正午に時角を1回変更するだけの簡易追尾でも1.25倍程度の電力量の増加効果があることになる。

4. 年間データの集計と考察

図7は追尾および10° 固定の1日あたりの月別発電電力量を示したものである。グラフ中の□で示した簡易5とは1日5回の時角変更、▲で示した簡易AMPMとは正午に1回のみ時角を変更する簡易追尾(午前:10時の時角, 午後:14時の時角)のデータを示している。前節で述べたように、1996年1月以降は追尾装置の追尾モードを2週間毎に変更して測定したため、月別グラフではデータ数の不足から天候の影響を大きく受けたばらついたものとなっている。完全追尾のみで収集した1995年12月以前のデータによると、10° 固定の場合は季節によりかなり大きく変動するのに対して、完全追尾した場合は300Wh/day前後(2/95-11/95)ではほぼ一定の電力量が得られており、出力のならし効果のようなものがみられる。なお、8/95の電力量が突出しているのは、高松地区が水不足となった快晴続きの異常気象による特異データと考えられる。

図8は追尾および10° 固定の月別モジュール温度を示したものである。完全追尾のみで収集した1995年12月以前のデータによると、10° 固定の場合に対して完全追尾の場合の温度上昇は夏は2℃程度、冬は5℃程度、平均して約3℃高くなる程度であり、追尾した場合も10° 固定と同様に気温と相関関係を有する月別の変化傾向を示している。

表2は、1996年1月以降のデータについての各種追尾方式ごとの季節別集計結果を示している。2.1でも述べたように、追尾装置のハードウェアの構成上、簡易追尾の場合も赤緯は年間を通して追尾したデータに



なっていることに注意されたい。快晴の場合、前節でみたように10° 固定に対して、完全追尾1.5倍弱、正午に時角を1回変更するだけの簡易追尾1.25倍程度と電力増加効果にかなり差があった(図6参照)。一方、

表2 各種追尾方式の季節別集計 (1996年1月～1997年1月)

		春 (3 - 5月)	夏 (6 - 8月)	秋 (9 - 11月)	冬 (12 - 2月)	通年
全日射量 ^{#1} [kWh/m ² day] ^{#3}	完全追尾	4.95 (1.24)	6.59 (1.26)	5.03 (1.36)	4.76 (1.61)	5.25 (1.37)
	簡易5回	6.53 (1.27)	5.78 (1.21)	3.38 (1.27)	4.16 (1.54)	4.93 (1.32)
	簡易AM-PM	5.45 (1.23)	5.63 (1.17)	4.54 (1.38)	4.61 (1.57)	5.09 (1.30)
モジュール1枚の ^{#1} 発電電力量 [Wh/day]	完全追尾	277.41 (1.19)	349.49 (1.25)	276.26 (1.35)	274.76 (1.59)	291.29 (1.35)
	簡易5回	365.91 (1.24)	308.99 (1.21)	183.52 (1.23)	240.16 (1.49)	274.19 (1.29)
	簡易AM-PM	305.43 (1.19)	299.36 (1.16)	251.78 (1.36)	269.78 (1.53)	282.44 (1.28)
発電効率 ^{#1} [%]	完全追尾	11.26 (0.96)	10.66 (0.99)	11.04 (0.99)	11.57 (0.99)	11.19 (0.98)
	簡易5回	11.26 (0.98)	10.71 (0.99)	10.89 (0.97)	11.57 (0.97)	11.17 (0.97)
	簡易AM-PM	11.26 (0.96)	10.66 (0.99)	11.13 (0.98)	11.72 (0.97)	11.16 (0.98)
モジュール平均温度 ^{#2} [°C]	完全追尾	21.26 (19.68)	38.43 (36.37)	27.59 (24.72)	14.16 (9.73)	23.92 (20.95)
	簡易5回	24.82 (22.27)	35.61 (34.07)	25.34 (23.50)	12.84 (9.41)	23.33 (20.86)
	簡易AM-PM	21.20 (19.24)	35.86 (34.55)	24.35 (21.32)	11.52 (7.89)	23.92 (21.50)
有効データ日数 [day]	完全追尾	28	28	32	46	134
	簡易5回	33	29	28	44	134
	簡易AM-PM	31	35	31	28	125

#1: 表下段()内の数字は10° 固定モジュールに対する比率を表す。

#2: 表下段()内の数字は10° 固定モジュールの実測温度を表す。

#3: 1kWh/m²=3.6MJ/m²

天候の影響を受ける季節別の集計では、完全追尾と正午に時角を1回変更するだけの簡易追尾は、季節ごとにはほぼ同じ程度の電力増加効果になっている。すなわち、非集光型の太陽電池モジュールを用いる場合、正午に1回のみ時角を変更する簡易追尾は、季節毎に1回程度仰角調整を行えば、完全追尾とほぼ同等の電力

増加効果を得られる有効な方法であるといえる。定量的な電力増加効果は通年で、年間最適傾斜角の1.2倍程度と推測できる¹⁾。なお、追尾した場合の発電効率がすべて10° 固定の場合に比べて悪くなっているのは、モジュール温度が追尾した場合は10° 固定の場合より約3℃程度高くなることによる。

図9は追尾装置の対比システムである10° 固定モジュールと47kW大型太陽光発電システムの直流側のモジュール1枚あたりの月別発電電力を表している。傾向としては、Pmax制御が常時適切に行われていたと考えられる対比システムの10° 固定が、ほぼ同一条件で設置されている大型システムの10° 固定モジュールより若干多めの電力を発生している。これは、日射量の少ない場合において大型システムは適切なPmax制御が行われていない、サブアレイ結線をしているものの

† 春期は年間最適傾斜角30° 固定と10° 固定の傾斜面全日射量がほぼ等しく、南中時には追尾と固定の出力もほぼ等しくなり赤緯追尾の影響は無視できる。この時、10° 固定に対して簡易追尾の発電電力量は表2より1.19である。また、内部資料⁽⁸⁾より、高松地区の年間最適傾斜角30° と10° 固定の場合の1995年1月から1996年12月までの積算日射量の比率は1.034であった。したがって、表2の10° 固定に対する通年の値1.28より、簡易追尾の場合も仰角調整していることによる増加効果(30° 固定と冬期に適した50° 固定の積算日射量の比率も1.034程度と考えられる)も考慮して(1.28/1.034)/1.034=1.2倍程度と推算できる。

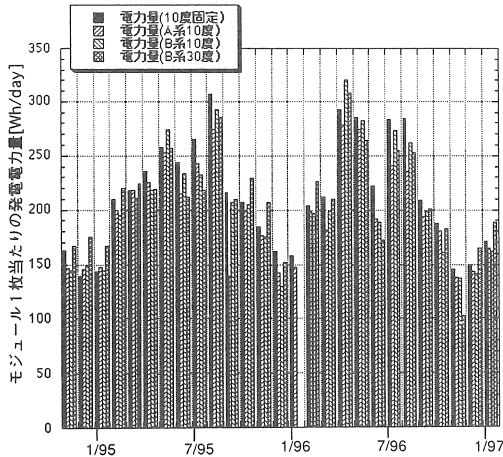


図9 47kW大型太陽光システムの月別発電電力

ミスマッチ損失や集電部分の抵抗損失が存在する等の理由によると考えられる。なお、47kW大型システムは月によってはインバータの不調によりシステムが停止していた期間があるため、天候の影響をうけて本来同じであるべきA系10°とB系10°のデータにばらつきが生じている。

5. おわりに

非集光型の太陽電池モジュールについて、試作開発した太陽追尾装置を利用して、1日1回のみ時角を変更する簡易追尾など各種追尾方式ごとの発電電力増加効果を約2年間にわたる長期間の実測データをもとに考察した。主な結果は以下の通りである。

(1) 快晴時、完全追尾を行っても1.5倍程度の電力量の増加しかないのに対し、正午に時角を1回変更するだけの簡易追尾でも1.25倍程度の電力量の増加効果があらわれる。

(2) 季節別の集計結果から、完全追尾と正午に時角を1回変更するだけの簡易追尾は、季節ごとに1回程度の仰角調整を行えば、ほぼ同じ程度の電力増加効果を有する。その電力増加効果は通年で、年間最適傾斜角の1.2倍程度と考えられる。

もし、隣接モジュール同士の影の影響を無視できれば、1日1回時角を変更するだけで2割程度の電力増

加が見込まれることから、手動等で簡単に時角を1回変更可能とする簡易追尾の構成、モジュールの配置方式を太陽光発電システムの設置形態の1つとして検討されることを期待する。特に、設置のための敷地に制約が少なく、人力による簡易追尾も可能と考えられる発展途上国や遊牧民のための太陽光発電の設置方式として有望と思われる。

最後に、当所の太陽光発電システムの導入に際しご尽力された四国工業技術研究所榊原実雄元首席研究官、勝村宗英基盤技術部長および(株)四国総合研究所に謝意を表するとともに、適切なご指摘をいただいた校閲者に感謝する。なお本研究の主要な部分は、ニューサンシャイン計画「太陽光発電システムの実用化のための解析評価」の内、周辺技術研究開発のための解析評価で行われたものである。関係各位に感謝する。

文献

- (1) 水上淳二, 住宅用太陽光発電システムの導入方策, 太陽エネルギー, 20-5 (1994), 9-13.
- (2) 池田祐二, 個人住宅用太陽光発電システム, 電気学会誌, 116-12 (1996), 817-820.
- (3) 黒川浩助・若松清司, 太陽光発電システム設計ガイドブック (1994), 208-213, オーム社, 東京.
- (4) 西川省吾, 地上設置形太陽電池アレイの最適傾斜角に関する検討, 太陽エネルギー, 22-2 (1996), 25-32.
- (5) 本間琢也・丹野賢・片山正純・大澤靖治, 影解析法による太陽追尾システムの動作解析, 電気学会論文誌D, 108-D-2 (1988), 159-166.
- (6) 今仁和武・知念正紀, 太陽追尾光発電, エネルギー・資源, 7-2 (1986), 184-189.
- (7) J. M. Gordon, J. F. Kreider and P. Reeves, Tracking and stationary flat plate solar collectors: Yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications, *Solar Energy*, 47-4 (1991), 245-252.
- (8) 山本博隆・伊賀淳・石原薫・他, 実用的I-Vカーブ作成法を使った太陽光発電出力・発電量計算の活用, 太陽エネルギー, 22-1 (1996), 24-32.
- (9) 仙波日出夫, 50kW級ビル屋上設置型太陽光発電システムについて, 第12回太陽光発電シンポジウム(1995-6), 8-29/8-36, 東京.
- (10) 内部資料, 太陽光発電の実証研究(1997-3), 53-92, (株)四国総合研究所, 高松.