The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	太陽光発電システムの最適化利用に関する研究
Author(s)	逸見, 次郎
Citation	大阪大学, 1993, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3072902
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

太陽光発電システムの
最適化利用に関する研究

1993年

逸　見　次　郎

4·3·1　風車特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６０
4·3·2　風車出力と速度、風速の関係およびシミュレーター動作特性・６３
４・４　併用システムの概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６７
４・５　併用システムの基本特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６７
4·5·1　昇圧チョッパの設計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・６７
4·5·2　最大出力点検索法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７０
4·5·3　電流検索時間の設定法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７１
4·5·4　併用システムの動作特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７６
4·5·5　実用化へのアプローチ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・７８
４・６　併用システムの利点・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８１
４・７　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８２
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８６

第５章　小規模分散型系統連系用周辺システムとその最適化利用
５・１　序・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８７
５・２　太陽光発電用インバータ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８７
５・３　最適なインバータ制御方式・・・・・・・・・・・・・・・・・・・８８
５・４　インバータ損失の算出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９４
５・５　制御系の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９４
５・６　試作装置の運転特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・９７
５・７　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０３
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０４

第６章　結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０６

付録１　太陽光発電システムの諸外国における開発状況
1·1　日本における太陽光発電開発状況・・・・・・・・・・・・・・・・１０９
1·2　アメリカにおける太陽光発電開発状況・・・・・・・・・・・・・・１０９
1·3　ヨーロッパにおける太陽光発電開発状況・・・・・・・・・・・・・１１０
参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１９

謝　辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２０

研究業績・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２１

C. 研究会発表

[C1] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づく概念レベルプログラミング環境の設計, SIG-KBS-9503-9, pp.51-58, (1995).

[C2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:ドメインオントロジーのタスクコンテクストへの統合 -CLEPE におけるタスクドメインオントロジーの表現と利用 -, SIG-J-9601, pp.89-96, (1996).

[C3] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:問題解決環境：CLEPE におけるエンドユーザ支援機能, 信学技法 AI97-14, pp.17-24, (1997-07).

D. 全国大会発表

[D1] 瀬田 和久, 池田 満, Johan Vanwelkenhuysen, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーの表現とその利用 -Ontolingua による記述を通して -, 人工知能学会全国大会(第九回)論文集, pp.379-382, (1995).

[D2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境へ向けての基礎的検討, 情報処理学会第 51 回全国大会, pp.3-177-3-178, (1995).

[D3] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境のためのオントロジー記述言語の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.207-210, (1996).

[D4] 瀬田 和久, 島 輝行, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づくエンドユーザプログラミング支援機能 - 問題解決過程における因果関係の明示化 -, 情報処理学会第 55 回全国大会, pp1-383-1-384 (1997)

[D5] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境 CLEPE における概念レベル実行環境の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.211-213, (1996).

[D6] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境におけるオブジェクトの状態変化のモデル化, 人工知能学会全国大会(第十一回)論文集, pp.249-252, (1997).

C. 研究会発表

[C1] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づく概念レベルプログラミング環境の設計, SIG-KBS-9503-9, pp.51-58, (1995).

[C2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:ドメインオントロジーのタスクコンテクストへの統合 -CLEPE におけるタスクドメインオントロジーの表現と利用 -, SIG-J-9601, pp.89-96, (1996).

[C3] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:問題解決環境：CLEPE におけるエンドユーザ支援機能, 信学技法 AI97-14, pp.17-24, (1997-07).

D. 全国大会発表

[D1] 瀬田 和久, 池田 満, Johan Vanwelkenhuysen, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーの表現とその利用 -Ontolingua による記述を通して -, 人工知能学会全国大会(第九回)論文集, pp.379-382, (1995).

[D2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境へ向けての基礎的検討, 情報処理学会第 51 回全国大会, pp.3-177-3-178, (1995).

[D3] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境のためのオントロジー記述言語の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.207-210, (1996).

[D4] 瀬田 和久, 島 輝行, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づくエンドユーザプログラミング支援機能 - 問題解決過程における因果関係の明示化 -, 情報処理学会第 55 回全国大会, pp1-383-1-384 (1997)

[D5] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境 CLEPE における概念レベル実行環境の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.211-213, (1996).

[D6] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境におけるオブジェクトの状態変化のモデル化, 人工知能学会全国大会(第十一回)論文集, pp.249-252, (1997).

C. 研究会発表

[C1] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づく概念レベルプログラミング環境の設計, SIG-KBS-9503-9, pp.51-58, (1995).

[C2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:ドメインオントロジーのタスクコンテクストへの統合 -CLEPE におけるタスクドメインオントロジーの表現と利用 -, SIG-J-9601, pp.89-96, (1996).

[C3] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:問題解決環境：CLEPE におけるエンドユーザ支援機能, 信学技法 AI97-14, pp.17-24, (1997-07).

D. 全国大会発表

[D1] 瀬田 和久, 池田 満, Johan Vanwelkenhuysen, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーの表現とその利用 -Ontolingua による記述を通して -, 人工知能学会全国大会(第九回)論文集, pp.379-382, (1995).

[D2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境へ向けての基礎的検討, 情報処理学会第 51 回全国大会, pp.3-177-3-178, (1995).

[D3] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境のためのオントロジー記述言語の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.207-210, (1996).

[D4] 瀬田 和久, 島 輝行, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づくエンドユーザプログラミング支援機能 - 問題解決過程における因果関係の明示化 -, 情報処理学会第 55 回全国大会, pp1-383-1-384 (1997)

[D5] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境 CLEPE における概念レベル実行環境の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.211-213, (1996).

[D6] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境におけるオブジェクトの状態変化のモデル化, 人工知能学会全国大会(第十一回)論文集, pp.249-252, (1997).

C. 研究会発表

[C1] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づく概念レベルプログラミング環境の設計, SIG-KBS-9503-9, pp.51-58, (1995).

[C2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:ドメインオントロジーのタスクコンテクストへの統合 -CLEPE におけるタスクドメインオントロジーの表現と利用 -, SIG-J-9601, pp.89-96, (1996).

[C3] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:問題解決環境：CLEPE におけるエンドユーザ支援機能, 信学技法 AI97-14, pp.17-24, (1997-07).

D. 全国大会発表

[D1] 瀬田 和久, 池田 満, Johan Vanwelkenhuysen, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーの表現とその利用 -Ontolingua による記述を通して -, 人工知能学会全国大会(第九回)論文集, pp.379-382, (1995).

[D2] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境へ向けての基礎的検討, 情報処理学会第 51 回全国大会, pp.3-177-3-178, (1995).

[D3] 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境のためのオントロジー記述言語の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.207-210, (1996).

[D4] 瀬田 和久, 島 輝行, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:タスクオントロジーに基づくエンドユーザプログラミング支援機能 - 問題解決過程における因果関係の明示化 -, 情報処理学会第 55 回全国大会, pp1-383-1-384 (1997)

[D5] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境 CLEPE における概念レベル実行環境の開発, 人工知能学会全国大会(第十回)論文集, pp.211-213, (1996).

[D6] 島 輝行, 瀬田 和久, 池田 満, 角所 収, 溝口 理一郎:概念レベルプログラミング環境におけるオブジェクトの状態変化のモデル化, 人工知能学会全国大会(第十一回)論文集, pp.249-252, (1997).

本論文で用いた主な記号ならびに用語

A、B：定数
A：　風車面積
a：　温度によりわずかに変化する関数
c：　光速
C_0、C_1、C_2：定数
C_F：高調波除去用コンデンサ
C_j：太陽電池の接合容量
C_p：出力係数
C_s：電圧振動抑制用コンデンサ
D（Duty）：通流率（＝T_{on}／T）
E_B：蓄電池端子電圧
E_c：伝導帯端エネルギー
E_g：禁止帯幅エネルギー
E_f：フェルミー準位
E_s：風速に対応させた電圧
E_v：価電子帯端エネルギー
h：プランク定数
h_0：太陽高度
I_1：チョッパ入力電流
I_2：チョッパ出力電流
I_0：基本波電流
I_d：ｐｎ接合のバイアス電流
I_{HD}：水平面直達日射成分
I_{HS}：水平面散乱日射成分
I_{HT}：水平面全天日射成分
I_{op}：最適動作電流
I_P：傾斜面全日射量
I_{PD}：直達日射量
I_{ph}：光電流
I_{PS}：散乱日射量
I_{PT}：傾斜面日射量
I_s：太陽電池のシミュレーター電流
I_{sc}：短絡電流
I_w：風力発電のシミュレーター電流
k：　ボルツマン定数
L_a：配線長のインダクタンス
L_F：フィルター及び連系用リアクトル
m：　質量
n：　ｐｎ接合ので決まる定数
N：　風車の回転数
P：　発電出力
P_0：有効電力
P_{IN}：インバータ入力電力
P_{in}：入射光のエネルギー密度
P_L：インバータ損失
P_{max}：最大出力
$P_{(0)}$：出荷時の発電出力
$P_{(t)}$：劣化時の発電出力
q：　電子の電荷
Q_0：無効電力
R：　風車の翼半径
R_s：太陽電池内部の直列抵抗
R_{sh}：太陽電池内部の並列抵抗
S：　受光面積
$S_{0\sim4}$：太陽電池シミュレーター特性
T：　絶対温度
T_{off}：オフ時間
T_{on}：オン時間
V：　速度
V_0：インバータ出力電圧
V_1：チョッパ入力電圧
V_2：チョッパ出力電圧
V_l：系統電圧
V_{oc}：開放電圧
V_{op}：最適動作電圧
V_R：定数

V_{R0}：　２５℃におけるV_Rの値
V_s：　アレイ電圧
V_{ss}：太陽電池のシミュレーター電圧
V_{sw}：風力発電のシミュレーター電圧
W：　運動エネルギー
$W_{0\sim3}$：風力発電シミュレーター特性
X：　リアクタンス
ΔV_1：入力電圧の許容変動値
Δt：検索時間
α：　初期回復率
α_0：緯度
β：　傾斜角
β_0：減衰因子
γ：　増加因子
δ：　太陽赤緯
η：　太陽電池の変換効率
η_{IV}：インバータ効率
κ：無効電力に見合った１に近い定数
λ：　減衰定数
λ_0：吸収端波長
ν：　振動数
ρ：　地表面の反射係数
σ：　空気の密度
τ：　アニール周期
τ_1：初期劣化期間
τ_2　二次劣化期間
ϕ：　位相差
ϕ_0：パネル方位角
ψ：　太陽方位角
$\cos\theta$：動作点の力率

太陽電池：　太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換する素子。
セ　ル　：　太陽電池の最小単位の素子でフレーム等で保護されていないもの。
モジュール：複数のセルをガラス、フレーム等で一体化した最小単位。
ア　レ　イ：モジュールを複数個一体化したもので、架台に固定されたもの。
太陽光発電システム：太陽電池と周辺設備（インバータ、蓄電池、系統連系装置、架台など）を含めた構成形態。
ハイブリッドシステム：太陽光発電と風力発電あるいは太陽光発電と波力発電など他の自然エネルギーと併用して用いる方式。
サイリスタ：ｐｎｐｎ接合の内部帰還動作によってオン状態にスイッチする半導体素子。(Thyristor)
ＳＩ（静電誘導形サイリスタ）：通常の素子は通電がゲート近傍から横方向へ広がっていくのに対して、全チャネルがほぼ同時に通電状態となるので、ターンオン時間が短く、di/dt耐量も大きい半導体素子。(Static Induction Thyristor)
ＧＴＯ：ゲート信号でターンオフできる半導体素子。(Gate Turn Off Thyristor)
パワＭＯＳＦＥＴ：スイッチング速度が速く、熱暴走がなく、ｎ・ｐチャネルのコンプリメンタリが可能で、微細化と高密度化によってオン抵抗の改良が達成された半導体素子。
ＣＶＣＦ：定電圧・定周波数電源の略で、コンピュータ用無停電電源として用いられる。(Constant Voltage Constant Frequency)

ＶＶＶＦ：可変電圧・可変周波電源の略で、圧延機や工作機械などの誘導電動機駆動用電源として用いられる。(Variable Voltage Variable Frequency)

インバータ：直流電力を交流電力に変換する装置。(Inverter)

ＰＷＭインバータ（Pulse Width Modulation：パルス幅変調）交流半サイクルの間で複数のパルス状出力を作りだして電圧の大きさを制御したり、低次高調波を低減する目的で利用される。

チョッパ：直流電力を電圧の異なる直流電力に直接変換する装置をチョッパといい、出力電圧を入力電圧に対して高くするチョッパを昇圧チョッパ、低くするのを降圧チョッパという。(Chopper)

ＦＦ（曲線因子）：太陽電池の出力特性における開放電圧×短絡電流と最適動作電圧×最適動作電流の面積比をいう。（Fill Factor)

ＡＭ（エアマス）：地球大気に入射した直達太陽光が通過した路程の長さをエアマスという。(Air Mass)

Ｓ・Ｗ効果（Stabler-Wronski effect）：水素化アモルファスシリコン（a-Si:H）膜に連続的に光を照射すると、暗導電率および光導電率が低下する現象。

ダングリングボンド：ａ－Ｓｉは原子配列が規則的でなく、全てのＳｉ原子がきちんとつながっていない場所すなわち、原子の抜け孔や共有結合枝が切れた状態をいう。(Dangling-bond)

ＨＡＰＳ（Heating,Air-conditioning and Sanitary engineering Program）：気象庁の観測結果から標準的な１時間単位の気象データとしてまとめられたもの。

ＩＥＣ（International Electrotechnical Commission）：国際電気会議

ＲＯＭ（Read Only Memory）：読みだし専用

Ａ／Ｄ：アナログ信号をディジタル信号に変換

Ｄ／Ａ：ディジタル信号をアナログ信号に変換

ＴＳＲ（Top Speed Ratio）：周速比

マルチプレクサ（Multiplex）：時分割方式で消費電力を節約する表示方式

ＧＰ－ＩＢ：接続される装置間の種々の違いを調整し、情報伝達が正しく行えるよう設計された回路で、ここでは外部入力をコンピュータで制御している。

Ｍ－Ｇ（Motor-Generator）：電動機－発電機

第１章　序　論

１・１　本研究の背景

１９７３年、７９年の２度にわたる石油危機は、我が国のエネルギー需給構造の脆弱性を顕在化させ、石油依存型のエネルギー自給政策に対する早急な見直しの必要性を痛感させた。石油に代る代替エネルギーとして石炭、原子力、ＬＮＧの利用拡大、省エネルギーの推進を計るなどの対策がとられるとともに、新エネルギーに対する研究開発が精力的に進められている。

通産省を中心とした「サンシャイン計画」は、将来のエネルギーセキュリティーに備えた長期的な新エネルギーの技術開発計画で、２１世紀にはエネルギー需要の相当部分を賄うことを目標としている。新エネルギーには、太陽エネルギーを直接利用した太陽熱発電や太陽光発電、また間接利用した水力、風力、潮汐、さらに地熱や河川の温度差、工場の廃熱、都市部からでる廃棄物の燃焼熱による発電など実用化が可能と見られるものについて、現在研究開発が進められている。

しかし、１９８０年代に入ってエネルギー需給が緩和してきたことから、新エネルギーの研究開発にブレーキがかかり、エネルギー多量消費化傾向が目立つようになってきた。ところが、８０年代の後半入ると、貴重な化石燃料を使い放題に浪費してきたことにより、大気中の炭酸ガス濃度の増加による「温室効果」が表面化し、また多量の亜硫酸ガスによる酸性雨が、世界的な規模で森林や湖に深刻な被害を及ぼしはじめている。チェルノブイリ（ソ連）で起こった原子力発電所の事故によりもたらされた環境汚染は、地球上に局部的とはいえ使用不可能な地域を作る結果となった。

このように地球的規模で進む環境汚染がクローズアップされてきたことにより、密度は希薄であるが供給量が膨大でクリーンな太陽光発電が新エネルギーの主役として再び注目されてきた。太陽光を直接電力に変換する太陽電池は、製造技術や新材料などの開発によって変換効率は１２％を越え、さらに量産化技術の開発により以前は、１［Ｗ］当り２万円もしていた太陽電池価格も８００～６００円近くにまでコストダウンし、現行の発電コストと競合するまでにあと１歩のところにまできている。

本研究は、今後の技術的ブレークスルによって一層のコストダウンが図られ、２１世紀の新エネルギー源として、実用化とその普及が最も大きい太陽光発電システムの最適化設置方法、自然エネルギーの有効利用を図ったハイブリッドシステムの制御方法および、系統連系方式による個人住宅用光発電システムの構成とその最適

な制御方法について行なったものである。

１・２　太陽エネルギーとその利用分野

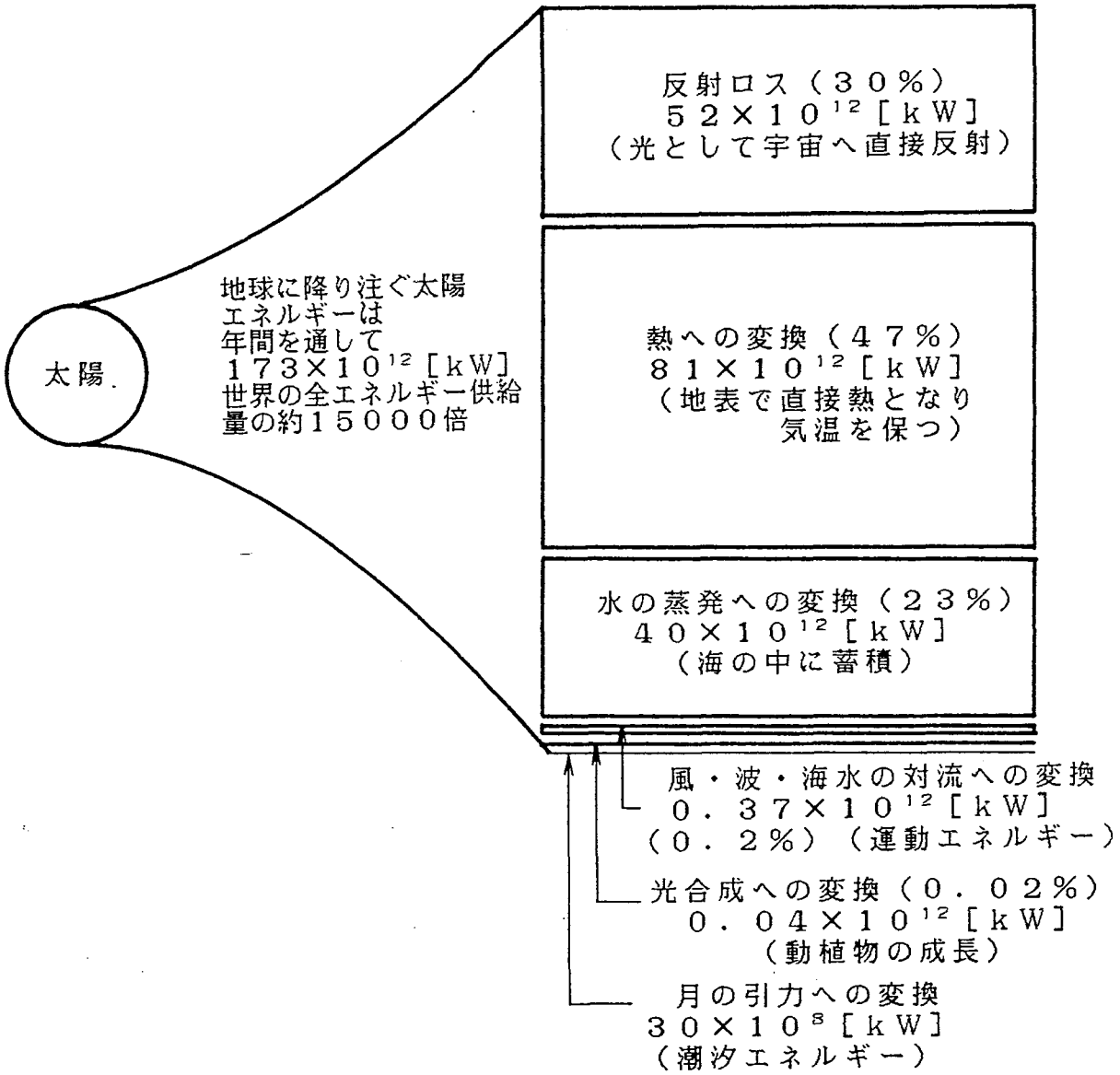
太陽から地表には、毎年１７４×１０^{12}［ｋＷ］ともの超高密度で放射される光エネルギーが届いている。これは現在、世界全体で消費されるエネルギー量のほぼ１５０００倍に匹敵する。だが、地球にやってくる太陽エネルギーの約３０［％］は、光として宇宙へ反射され、約４７％は地表で直接熱となり気温を保つ。残りの約２３％は海水中に蓄積され、一部は蒸発し雲や雨に変換される。
地表に到達する太陽光エネルギーは、０．０６％（１．３７［ｋＷ/ｍ^2］）と極めて少なく（図１－１）[1]、これが全ての生命と化石燃料を造り光合成を行なっている。このわずかな太陽エネルギーの利用分野は表１－１に示すように[2]、間接利用と直接利用に大別され、さらに熱利用と光利用に分けられる。間接利用の代表例は水力発電所で、揚水発電を含めた我が国における総量発電電力総量は約８５０億［ｋＷｈ］（１９８６年）、２０００年には９１０億［ｋＷｈ］の水力発電所を稼働する予定である。さらに風力や波力なども間接利用となる。直接熱利用の好例は普及がめざましい個人住宅用太陽熱温水器や給湯設備である。直接光利用の代表格が太陽電池によって光を電気に変換する方式で、付録１に述べる“太陽光発電システムの諸外国における開発状況”に見られるように、独立電源システムを始めとして系統連系や他の自然エネルギーを併用したハイブリッドシステムなど、太陽エネルギーの直接・間接利用分野は極めて広範囲にわたっている。

１・３　本研究の意義と目的

（１）太陽電池モジュールの最適化設置の実証

太陽エネルギーの供給形態は技術的にも規模的にも様々であり地域的格差も大きい。太陽電池を導入して光発電を行うには、従来のエネルギー供給とは異なった新しいアプローチが必要となる。さらに、密度が希薄な太陽エネルギーを効果的に取込み、太陽電池が本来持っている能力を十分発揮させることが重要である。

本研究は、まず、太陽電池の設置角が各地域によって様々であることから、太陽光エネルギーを有効に抽出できる傾斜面を推定計算により求め、得られ傾斜面に太陽電池を設置して水平面に対しての有用性を示し、各地域における傾斜面の最適値を推定した。また、建物や樹木などの影によりモジュールの一部分が遮光されると、全体の発電出力を低下させるばかりでなく、遮光されたセルの両端には高い逆電圧



地上で利用できるエネルギーは約１．３７［ｋＷ／ｍ²］

図１－１　地表に到達する太陽エネルギー

表１－１　太陽エネルギーの利用分野

	熱利用	光利用
間接利用	水力発電 風力発電 波浪発電 海洋温度差発電	光合成産物の利用 ・薪、ワラなどの直接利用 バイオマス変換（メタン、アルコール、水素） ・エネルギー植物（青珊瑚ユーカリなど） 光合成機構の利用 ・促成栽培（光量、温度、CO_2などの制御） ・人工光合成*
直接利用	太陽熱冷暖房・給湯 太陽熱蒸留 太陽熱発電 太陽熱電子発電 太陽熱プロセス・ヒート 太陽熱水素製造 太陽熱による物質の溶融	太陽電池 光化学電池* 光化学的水素・電力製造*

（*：方式により両方にまたがるもの）

が印加され、セル特性を低下させる原因となる事実について示した。さらに、太陽電池を設置する際に生じる物理的変化や損傷状態、長期にわたって変化する出力特性などの診断が可能な測定器の必要性が高いことから、太陽電池出力を設置場所で測定可能な簡易測定器を開発し種々の測定に用いた結果、良好な出力特性が得られることを明らかにした[3][4]。

太陽電池出力は気象条件に左右されることから、通常は太陽電池出力と負荷との間に最大出力制御装置が挿入される。制御装置はオン・オフ動作に伴って太陽電池出力端に振動電圧・電流を発生する。ここでは、この振動電圧・電流の原因を明らかにすると共に振動抑制法を示した[5]。

（２）アモルファス太陽電池の光誘起劣化現象の抑制方法

アモルファス太陽電池は、低コストかが図れる太陽電池として期待されている反面、光照射による初期劣化（Staebler·Wronski効果）が電力用として実用化するための妨げとなっている。

本研究は、このような劣化現象を調査するため、アモルファス太陽電池を屋外に設置して経時変化特性を観測してきた。光照射後１～２ヵ月で大きく低下した出力が夏季の温度上昇により回復し、冬期に減少する傾向を繰り返しながら少しずつ低下していく経時変化特性が得られた。ここでは、この夏期の回復効果に着目して、劣化したアモルファス太陽電池を外部から直接アニール処理する集光加熱装置を試作した。劣化したアモルファス太陽電池をケースに挿入し集光点に設置して加熱した結果、発電出力が出荷時近くにまで回復することを示した。さらに、得られたアニール処理結果といくつかの仮定を基にシミュレーションを行なった。
その結果、集光加熱装置を用いたアニール処理法が恒温槽内で行った結果とよく一致していること、およびシミュレーションより、年に１回アニール処理を行えば光劣化抑制効果が大きいことを明らかにした[6][7]。

（３）太陽光・風力発電併用システムの最適化利用

自然エネルギーは密度が薄く断続的であることから、いくつかの自然エネルギーを併用して用いれば信頼性の高いエネルギー源となる。従来は、発電源ごとに出力電圧や周波数が異なることから、制御装置や蓄電池を用いて別々に制御し電力供給を行っていた。そのため気象変化に対する電源相互間の連系が困難となり変動に対応できず信頼性や稼働率の低下を招き、さらに個々に制御装置や蓄電池設備が必要なことから、コスト面に対する問題点も指摘されていた。

本研究は蓄電池電圧を利用して、それぞれの発電源出力端にチョッパを挿入し、チョッパの出力電流のみを検索する方法で、複数の自然エネルギー発電を同時に最大出力制御が可能な制御方法について行ったものである。試作装置を用いた実験結果から、検索時間の短縮と自然エネルギー発電源の数が多くなるほど、システムコストが低下することを示した。ここでは、自然エネルギー発電源として、相互の欠点を補い合う太陽光発電（夏期と昼間に多い）と風力発電（冬期と夜間に多い）を併用したシステム試作した。また、気象変化の影響を受けないでシステム評価が可能なシミュレーターを試作し、併用システムをさまざまな気象条件下で動作させた場合の運転特性から併用システムの有用性を明らかにした[5]。

（４）分散型系統連系用システムの最適化利用

太陽電池出力は、気象条件により大きく変動することから、太陽光発電システム単独では負荷への電力供給が不安定となる。このため蓄電池による電圧の安定化、商用電源との連系による電力供給の安定が図られている。特に、系統連系システムは、四国の伊予西条市における光発電システムや六甲アイランドをはじめ多く実験システムで既に実用化の段階に入っている。これまで行なわれてきた系統連系システムの制御方法には、

(1)基準太陽電池により最大出力点を計測し、太陽電池アレイ出力の最大出力動作点を制御する[8][9]。

(2)アレイ出力特性上の動作点を計測し、コンピーュタによりメモリ上のデータと比較しながら最大動作点を追跡し最適な方向へ制御する[10][11]。

(3)アレイの最大出力点電圧特性が日射量によってあまり変化しないことから、蓄電池電圧によりアレイ電圧を安定化して出力動作点を制御する[12]。

(4)アレイ出力電圧、電流を直接測定して常に最大出力動作点を追跡するようにインバータを制御する[13][14]。

などの方法で行われてきた。しかし、これらの方法にも一長一短があり、基準太陽電池のバラツキの影響、制御回路の複雑化、遅い応答性、蓄電池による定電圧化が招くアレイ出力を有効利用できないなどの問題が残されている。

本研究は、アレイの出力電圧が日射量の増加に伴ってわずかに増加傾向を示す点に着目して、アレイ電圧の増加電圧分をインバータ制御にとりいれた新しい制御方法を提案し、日射量や系統電圧変動に対して試作装置が安定に動作できることを示し、損失および高調波の少ない電力を負荷に供給できることを明らかにした[5][15][16]。

１・４　本論文の構成

本論文は、６章より構成され（表１－２）以下にその内容を示す。

２章では、日射量や日照時間、緯度、経度、温度および方位や影などの影響を受けて太陽電池出力が大きく変化することから、太陽光発電システムの実用化研究の一つである気象条件に最適なシステム設置法について述べる。また、太陽電池出力と負荷との間に挿入される最大出力制御装置が、オン、オフ動作を繰返すことによって電圧、電流に振動を伴うことから、この種の使用に対する基礎的な問題点を明らかにした。

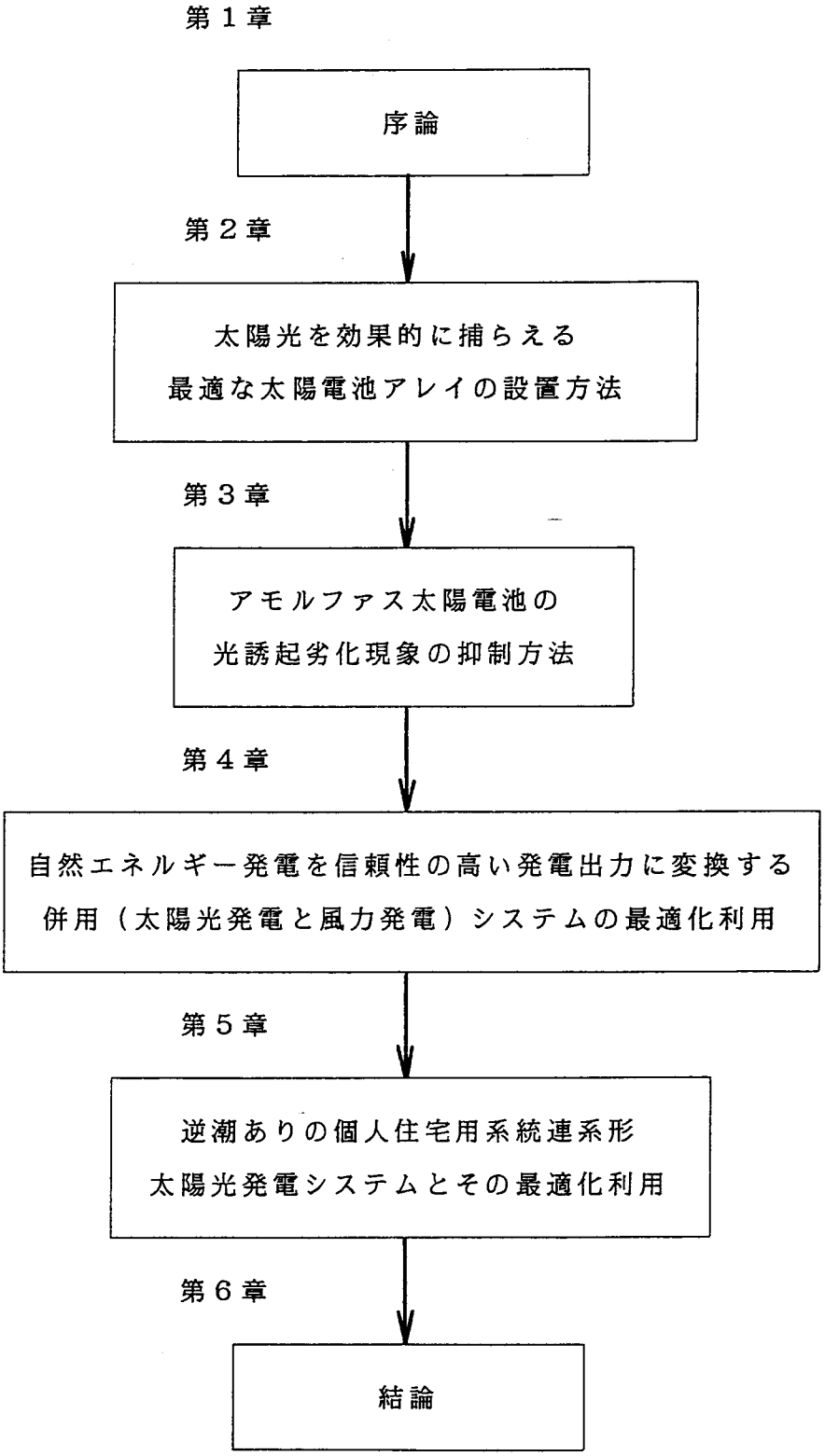
今後、普及が予想される太陽光発電システムの出力特性の変化や損傷状態あるいはメンテナンス行う場合、現地で短時間に太陽電池の出力特性が測定可能な簡易測定器（テスター並みに）が要求されてくる。ここでは、電力用半導体素子と簡単な制御回路とを組合せた簡易測定器を試作し、影の影響や劣化特性などの測定に用いた結果、短時間の特性評価が可能となった。

３章では、光照射を受けて光劣化が進行しているアモルファス太陽電池の発電出力および変換効率を経時変化法から調査した。夏期の温度上昇が劣化抑制に効果的に作用していることに着目して、外部から直接加熱して劣化抑制する集光加熱法を提案する。試作装置を用いて行ったアニール処理結果とシミュレーション結果から、集光加熱法が劣化速度の抑制に効果的に作用していることを明らかにした。

４章では、複数の自然エネルギー発電源を並列に用いることによって、自然エネルギー発電は信頼性を得ることができる。ここでは、太陽光発電と風力発電を併用したシステムを試作した。最大出力制御は、各発電端に挿入したチョッパの出力電流最大値を検索して行なっていることから、従来のコンピュータ制御に比べて応答性が速く、制御回路が簡単化される。また、この制御法は独立電源用としてまた、系統連系用としても適用可能なシステムとなる。

５章では、気象変動に追従して太陽電池から常に最大出力を抽出する最大出力点制御を行うと同時に、系統電圧変動に対しても安定した運転特性を保証する系統連系用制御方式を提案する。この制御方法は、日射量の変化に対してわずかに増減するアレイ電圧の変化分をインバータの制御関数にとり入れたものである。系統連系用ＰＷＭインバータを試作し、日射量および系統電圧変動に対して行った実証試験から、安定した運転特性が得られていることを確認した。

表１－２　本論の構成


第１章
序論
第２章
太陽光を効果的に捕らえる
最適な太陽電池アレイの設置方法
第３章
アモルファス太陽電池の
光誘起劣化現象の抑制方法
第４章
自然エネルギー発電を信頼性の高い発電出力に変換する
併用（太陽光発電と風力発電）システムの最適化利用
第５章
逆潮ありの個人住宅用系統連系形
太陽光発電システムとその最適化利用
第６章
結論

参考文献

(1) 太陽エネルギー　日本の科学と技術11-12 Vol.21 1980

(2) エネルギー　サイエンス　日経サイエンス社 Vol.12 1981

(3) 逸見次郎：太陽電池の出力特性に関する研究 太陽エネルギー学会論文誌 Vol.18 No.1 pp.13-20 1992

(4) J.Itsumi:Study on the Output Power Degradation of Solar Battery. Procssdings of International Confernce on New and Renewable Energy, Beijing,CHINA'90,E-13 pp.533-539 1990

(5) 逸見、岩堀、山形、池田：自然環境エネルギー発電システムに関する研究 電気学会論文誌 Vol.107-B No.8 pp.404-411 1987

(6) アモルファス太陽電池の長期劣化抑制法に関する研究 日本太陽エネルギー学会論文誌 Vol.93-03 投稿中

(7) J.Itsumi : The control method against the long period deterioration of the amorphous solar cell. ISES'93 Budapest 1993

(8) D.A.Fox etal:Peak Power Tracking Technique for Photovoltic Arrays IEEE PESC p219 1979

(9) 北川、他：太陽光発電システム　サンケイ技報　Vol.14 1984

(10) 大西、沖津、皆本、他：マイクロコンピュータによる太陽光発電最大出力追従制御システ ム　電気学会四国支部連大 No.9-8 1982

(11) 大西、沖津、皆本、他：マイクロコンピュータによる太陽光発電電力変換制御システ ム　電気学会全大 No.502 1983

(12) 上之園、他：太陽光発電用変換装置　東芝レビュー　Vol.35 1065 1980

(13) 川平、市東、江口、徳永：太陽光発電システムの開発 日立評論 Vol.63 25 1981

(14) 原島、他：太陽光発電システムにおけるエネルギーフロー制御 電気学会半導体電力変換研資 SPC-84-1 1984

(15) Y.Ikeda,J.Itsumi and H.Funato : The Power Loss of the PWM Voltage-Fed Inverters. Electronics Specialists Conference and the 19 Japan II-C-5, pp.277-283 1988

(16) 逸見、船渡、池田：　ＰＷＭインバータの短絡電流抑制と損失評価 電気学会論文誌 Vol.111-D No.9 pp.741-750 1991

第２章　太陽電池モジュールの最適化設置に関する実証研究

２・１　序

本章では、太陽光発電を設置する際の設計指針となる日射量や日照時間、温度や方位、影などの気象条件および緯度により異なる傾斜角などの基礎的特性を長期間にわたって調査し、その結果を受けて太陽光発電システムがその能力を充分に発揮できる最適化設置法の実証研究について論じている[1]。

本研究は、まず緯度により各地域における設置角が異なることから、太陽光エネルギーを有効に抽出できる傾斜角を推定計算により算出し、各地域における傾斜角の最適値を求める。また、建物や樹木などの影がモジュールの一部分を遮光した場合、遮光されたセルの損傷状態および発電出力全体に及ぼす影響などを明らかにする。さらに、今後、普及が予測される太陽光発電システムの劣化や損傷状態などの出力特性を、短時間に現地で測定可能な簡易出力測定器が要求される。ここでは、電力用半導体素子と簡単な制御回路とを組合わせた簡易測定器を開発し、各種測定に用いた結果、良好な出力特性が得られたことを示す。

太陽電池出力は、気象条件に大きく左右されることに対応して、負荷との間に最大出力制御装置が挿入される。制御装置のオン・オフ動作に伴って出力電圧・電流に振動が生じることから、振動の原因を明らかにしその対策を示した。

２・２　太陽電池の動作特性

太陽電池は半導体の光起電力効果を利用した一種の光電変換素子である。太陽電池に振動数νの光が入射することにより光子一個当りのエネルギー$h\nu$は、半導体のエネルギー・ギャップ（禁止帯幅）をE_gとすれば、次式で与えられる。

$$h\nu = hc / \lambda_0 = E_g \qquad (2-1)$$

ただし、c：光速、h：ﾌﾟﾗﾝｸ定数、ν：振動数、λ_0：基礎吸収端波長（シリコンで約１．１μm）

エネルギーが吸収されると価電子帯にある電子は励起され、禁止帯を飛び越えて伝導帯に遷移する（図２－１）。この結果、結晶中に電子と正孔の対が生成され拡散によって移動し、接合領域まで到達したものは再結合することなく空乏層領域へ達し、接合部に形成された強い電界に引かれて電子はｎ層へ、正孔はｐ層へ流入する。この時、外部回路を短絡しておけば入射光量に比例した光電流が流れる。この電流を短絡電流I_{sc}という。一方、外部回路が開放された状態では、このキャリヤの流入によりそれぞれｎ層はマイナスにｐ層はプラスに帯電し、ｎ層のフェルミ準位が

ｐ層のフェルミ準位に比べてもち上がる結果、ｐｎ接合間に電位差V_{oc}が生じる。この値は外部から観測でき、V_{oc}を光照射時の開放電圧という。

図２－２に示す太陽電池の構造図より、結晶形太陽電池は受光面に平行なｐｎ接合をもった大面積のダイオードとみなすことができるから、定電流源と並列にダイオードを接続した図２－３に示す等価回路で表すことができる。さらに、太陽電池の内部抵抗および電極部の抵抗などを含めた直列抵抗分R_sと、接合の不完全性や種々の理由により生じる並列抵抗分R_{sh}が加わるので、負荷抵抗に流れる電流Ｉは次式で与えられる。

$$I = I_{ph} - I_d \{\exp[\frac{q(V+IR_s)}{nkT}] - 1\} - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \qquad (2-2)$$

ただし、T：絶対温度　k：ボルツマン定数　I_{ph}：光電流　q：電子の電荷
n：ｐｎ接合で定まる定数　I_d：ｐｎ接合のバイアス電流

図２－４に太陽電池の電圧－電流特性を示す。V_{oc}は開放電圧、I_{sc}は短絡電流、P_{max}は最大出力点、ＦＦ（Fill Factor）は曲線因子を表わし、太陽光エネルギーを変換する際の重要な要素となる。開放電圧V_{oc}は（２－２）式の第１、２項よりまた、曲線因子ＦＦは最適動作電圧をV_{op}、最適動作電流をI_{op}とすれば次式で与えられる。

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln(\frac{I_{ph}}{I_d} + 1)$$

$$FF = \frac{V_{op} \cdot I_{op}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \qquad (2-3)$$

変換効率ηは、入射光のエネルギー密度をP_{in}、太陽電池の有効受光面積をＳ［m^2］最大出力をP_{max}（$=V_{op} \cdot I_{op}$）とすれば次式となる。

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot P_{in}} \times 100\ [\%] \qquad (2-4)$$

図２－５に示す測定例より、開放電圧V_{oc}は日射量の低い領域で急激に立上がり、日射量が増加するにつれてある値に飽和する。短絡電流I_{sc}は日射量に比例して増加していく[2]。温度上昇に対して、単結晶およびアモルファス太陽電池とも短絡電流は増加傾向を示すが、単結晶における開放電圧の低下が大きく夏期には１０％近く減少することもある（図２－６）[3][4]。

太陽電池の温度係数はそれぞれ、単結晶（ｃ－Ｓｉ）で－０．３３[%/℃]、アモルファス（ａ－Ｓｉ）で－０．２３[%/℃]の値をもつ。アモルファス太陽電池は、バンドギャップが大きいために若干小さい。

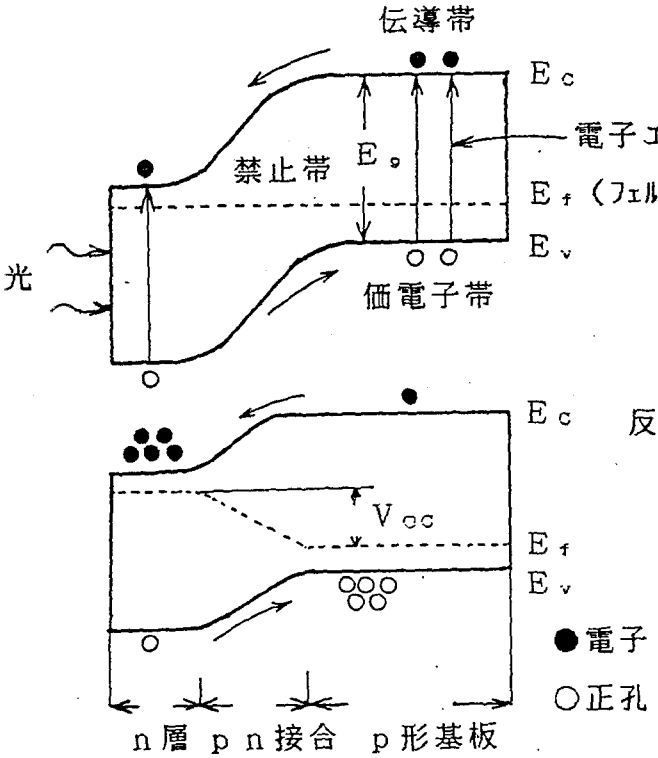


図２－１　光起電力効果

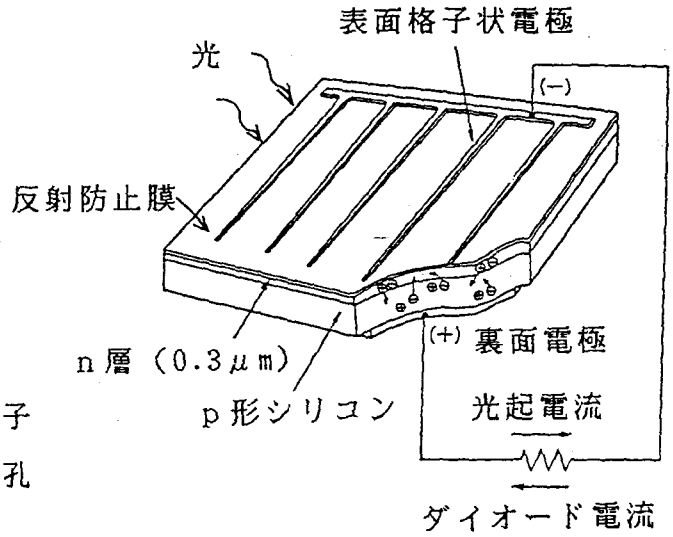
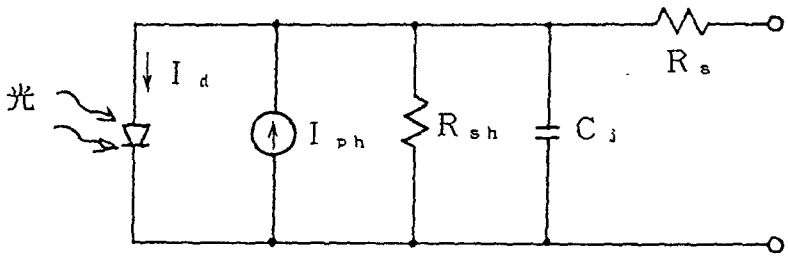


図２－２　太陽電池の構造



I_{ph}：入射光による発生電流
I_d　：pn接合のバイアス電流
R_s　：半導体自身の内部抵抗や接触抵抗による直列抵抗
R_{sh}：半導体の漏れ電流に起因する並列抵抗
C_j　：接合容量を合成したキャパシタンス

図２－３　太陽電池の等価回路

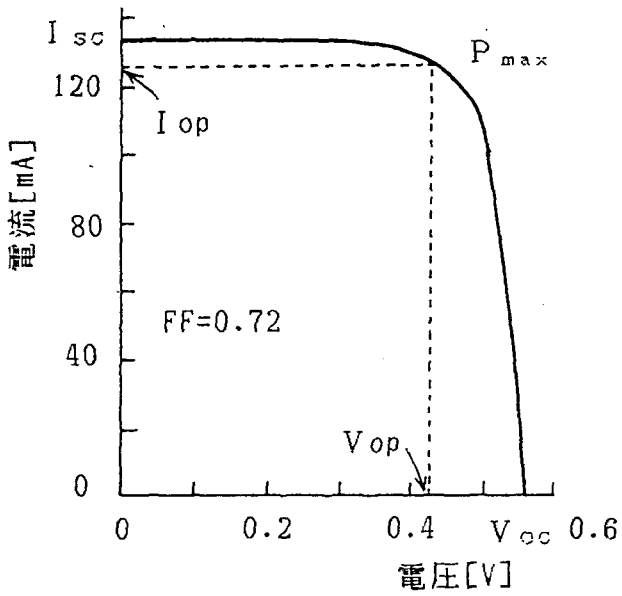


図２－４　太陽電池の出力特性

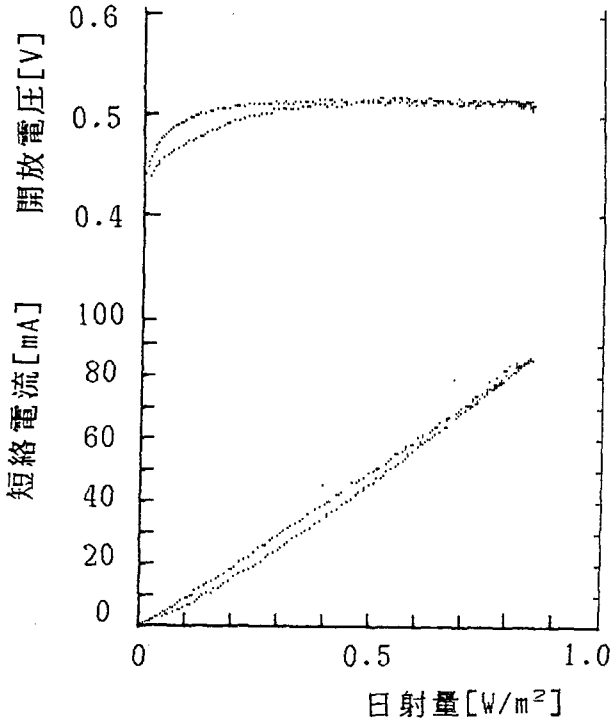
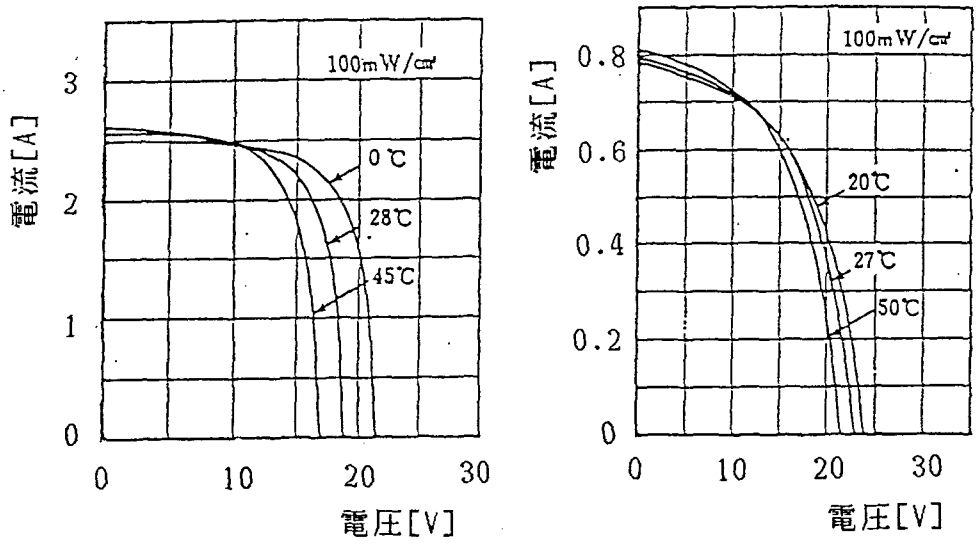


図２－５　開放電圧、短絡電流の測定例



（ａ）単結晶　　（ｂ）アモルファス

図２－６　太陽電池の温度特性

２・３　太陽電池の最適化設置法

太陽光発電システムは、将来のエネルギー源の一つとして期待がよせられており、本格的な実用化に向けて国の内外で勢力的な研究開発が進められている。
その一つに気象条件に適したシステム設計の研究がある。これは設置点の日射量、日照時間、緯度、温度および方位や影などの不均一な条件を十分調査して、太陽電池が本来もっている能力を有効に引出すための最適設計法を確立するものである。
他の一つは、最適なシステム構成とその制御方法を確立することであるが、これに関する実証研究は４章および５章において述べる。

本章では、屋外に単結晶およびアモルファス太陽電池を設置し開放電圧、短絡電流、温度および水平面日射量を計測し、各測定値をもとに設置場所の気象条件に最適な太陽光発電システム設置法について述べる。

２・３・１　最適化設置法の測定条件

図２－７に示す測定装置により次ぎの点を考慮して測定を行なった。

（１）長期にわたる計測を必要とすることから、データの取込みからその処理までのプロセスを全てコンピュータで行なった。

（２）日射量は変化が速くまた、取得するデータ数も多いことからデータ取込み時間が速くかつ多チャンネルを持つマルチチャンネル・セレクタを用いた。

（３）屋外の装置は高温、高湿など自然条件にできるだけ耐え得るもので構成した。

測定に用いた太陽電池の仕様を表２－１に示す。マルチチャンネル・セレクタは太陽電池の開放電圧、短絡電流、温度、日射量の各データを取り込みその出力をＧＰ－ＩＢを介してコンピュータに転送する。開放電圧は太陽電池の出力端子間で、短絡電流は出力端子間に低抵抗（０．１あるいは０．０５［Ω］）を挿入しその両端の電位差を測定した。温度は太陽電池の裏面に熱電対（銅－コンスタンタン）を取り付けて、マルチチャンネル・セレクタの温度測定用チャンネルで、日射量は全天日射計（MS-801 英弘精機製）により水平面日射量を測定した。光電セルによって日射量の増減を判別し、１日の時間帯を日照変化の速さを考慮して、３分間隔でコンピュータにより自動計測している。開放電圧、短絡電流、温度、日射量は月毎に平均化して、発電出力は（２－５）式より算出しメモリに保存すると同時に、処理したデータを画面上にグラフィック表示させた。

測定例として、１９８７年５月の晴天日における単結晶（ｃ－S_i）およびアモルファス（ａ－S_i）太陽電池の開放電圧と短絡電流を図２－８（ａ）に示す。
（ｂ）には日照時間に対する裏面温度と日射量を示した。短絡電流は日射量に対し

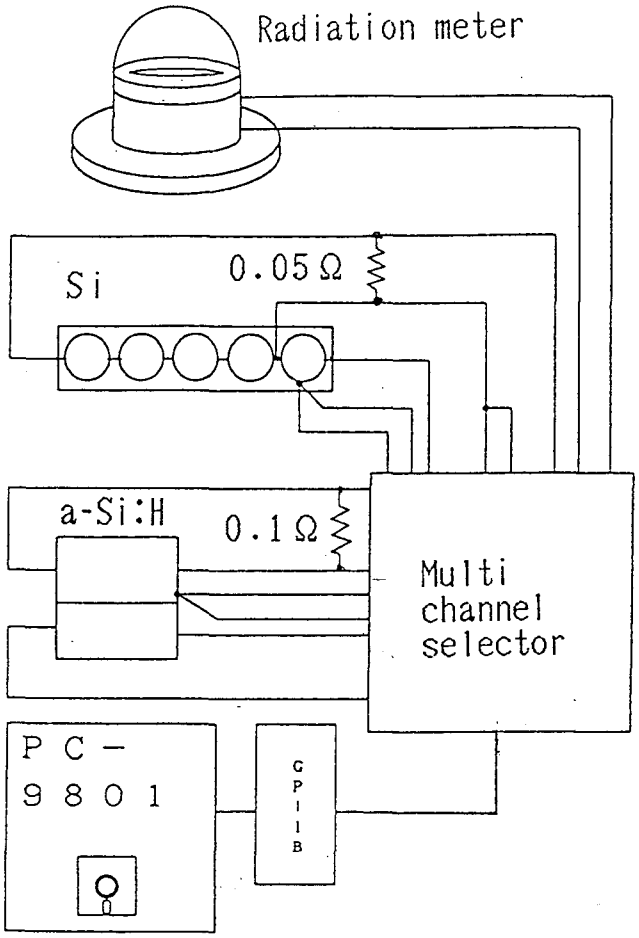


図２－７　測定装置

表２－１　太陽電池の仕様

試料番号	開放電圧 Voc[V]	短絡電流 Isc[mA]	最大出力 Pmax[W]	変換効率 η[%]	種類
No.1	5.1	0.095	0.43	6.4	a-Si:H
No.2	0.56	1	0.45	9.0	C-Si
No.3	20	0.28	4.2	11.9	〃
No.4	5.6	1	3.6	9	〃
No.5	5	1	4	14	〃
No.6	2.5	0.8	2.1	10	〃

て単結晶で９００［mA/kW·m^{-2}］、アモルファスで１００［mA/kW·m^{-2}］の比例関係を持つ。開放電圧は日射量が０．５［kW/m^2］附近からそれぞれ約０．５［Ｖ］、４．２［Ｖ］と飽和電圧に落着く。また、発電出力Ｐは太陽電池の受光面積をＳ［m^2］、開放電圧をV_{oc}［Ｖ］、短絡電流をI_{sc}［Ａ］、曲線因子をＦＦ（単結晶で0.7～0.8、アモルファスで0.5～0.7）とすれば（２－５）式で与えられる。

$$P = \Sigma \quad FF \cdot \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{S} \times 1000 \qquad [kW/m^2] \qquad (2-5)$$

水平面に設置した単結晶およびアモルファス太陽電池の１年間（８７年）における発電出力を図２－９に示す。４月～９月にかけて、入射光量が多いこともあって発電出力は高いが、１０月～３月は入射光量が減少することから発電出力は低い。
太陽光発電システムでは、このような面をカバーするために蓄電池を設けたり[6]、ほかの自然エネルギーとの併用あるいは系統連系などによって[7]、発電出力の安定供給を図っている。

２・３・２　傾斜角による影響

太陽電池は入射光量を有効に吸収するために、通常は太陽光に向けて適当な傾斜面を設けて設置されることから、傾斜面には直達日射成分の他に散乱日射成分が同時に入射することになる。水平面に対してβ°の傾斜角を設けた傾斜面全日射量I_Pは、傾斜面が受ける直達日射量I_{PD}、散乱日射量I_{PS}および反射して傾斜面に入射する日射量をI_{PT}とすれば（２－６）式で与えられる。

$$I_P = I_{PD} + I_{PS} + I_{PT} \qquad (2-6)$$

さらに、図２－１０に示す太陽電池パネル面への日射に関する各種角度および地表面の反射係数ρを用いて、傾斜面全体が受ける全日射量I_Pを求めると次式で表わされる。

$$I_P \fallingdotseq I_{HD} \cdot \{\cos\beta + \sin\beta \cdot \cos h_o \cdot \cos(\psi - \phi_o)\} + I_{HS} \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho I_{HT} \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} \qquad (2-7)$$

ただし、I_{HD}：水平面直達日射成分、I_{HS}：水平面散乱日射成分
I_{HT}：水平面全天日射成分、ϕ_o：パネル方位角、h_o：太陽高度

また、太陽方位角ψは次式で与えられる。

$$\cos\psi = \left\{ \frac{\sin h_o \cdot \sin\alpha - \sin\delta}{\cos h_o \cdot \cos\alpha} \right\} \qquad (2-8)$$

ただし、δ：太陽赤緯　α：緯度

前節で求めた月平均の水平面全天日射量（図２－９）を（２－７）式に代入して算出した傾斜面にける月毎の各種日射成分を表２－２示す。また、傾斜角に対する月毎の傾斜面日射量をＨＡＰＳの気象データ[8][9]を基に算出し表２－３に示した。ただし、ρ＝０．１５、ϕ_0＝０緯度は３５°２６′とし、δは各月を代表する日の太陽赤緯（北緯３５°を基準）を用いた。

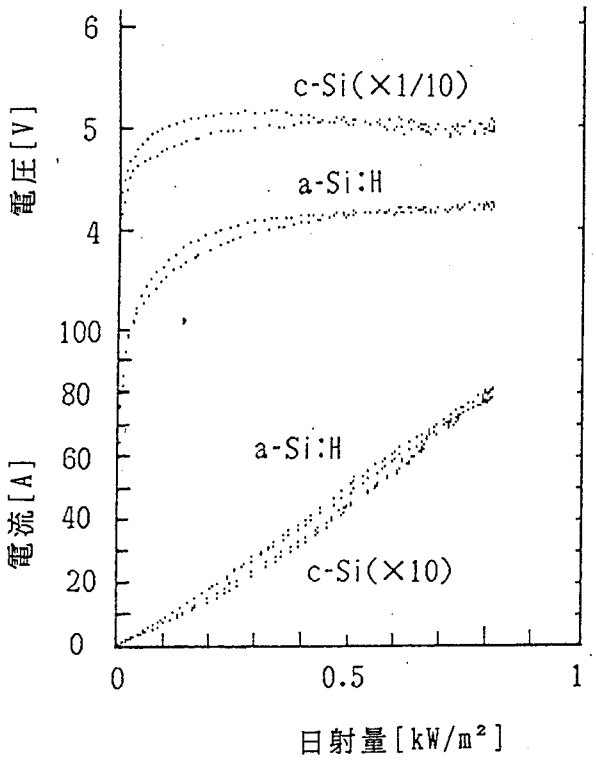
図２－１１は、各月毎の傾斜角にたいする傾斜面日射量を示したもので、傾斜角を高くとるに従って日射量の変動幅が少なくなり、年間を通して安定した発電出力を供給できる反面、年間の発電損失は大きい。図２－１２には、全天日射計で測定した水平面日射量をもとに算出した傾斜角を示したもので、日射量が最も多く得られる傾斜角は約２０～２５°付近にある。太陽高度は年間を通じて春分・秋分を中心に±２３°３０′変化するから、秋から冬にかけては傾斜角を５４°に、春から夏にかけては１４°１２′付近に移動すれば年間を通して太陽光を有効に捉えることができる[10]。従来は、傾斜角を緯度に等しい角度としていたが散乱日射成分の多い我が国の各地域における傾斜角は、各設置点の緯度から１１°４５′を引いた角度が最適値となる。

横浜の緯度は３５°２６′でその最適値はほぼ２３°付近にあることから、２３°の傾斜角を設けて単結晶およびアモルファス太陽電池を設置し、１９８６年９月よりの測定を開始した。

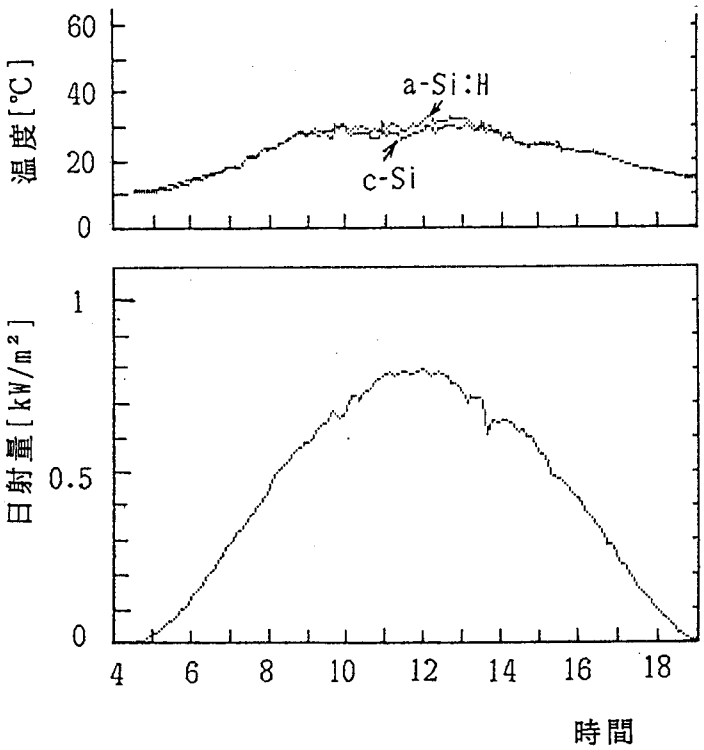
図２－１３は、水平面と２３°の傾斜角をもつ太陽電池の開放電圧および短絡電流である。日射量が０．５［ｋＷ／ｍ²］時における開放電圧および短絡電流を比較した場合、傾斜角を設けることにより１６．１％（０．８［Ｖ］）、１０．４２％（９．７［ｍＡ］）増加する。これを年間の発電出力比でみると（図２－１４）、少ない月で１５．３％、多い月では１９．８％も水平面に比べて高く、年間平均発電出力も１７．５％増加することになる。さらに、日射量の多い季節（４月～９月）と少ない季節（１０月～３月）とに分けて見た場合（図２－１５）、それぞれ２２％および１９．５％と季節面から見ても増加している。この様に適切な傾斜角を設けてアレイを設置すれば、年間の発電損失を低減できることが分った。

２・４　太陽電池の最大出力制御に伴う振動

図２－１６に示す太陽電池の電圧－電流特性から、最大出力点（P_{max}）は各日射量特性において一点しか存在しない。これに対して、太陽電池が実際に動作する出力点は日射量や負荷変動によってたえず変化し、最大出力点附近で動作させるこ



（ａ）開放電圧と短絡電流



（ｂ）時間に対する水平面日射量と温度

図２－８　１９８７年５月２１日の測定例

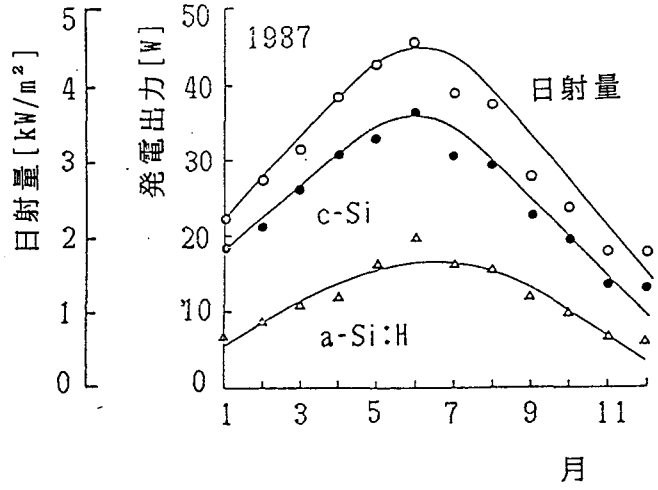
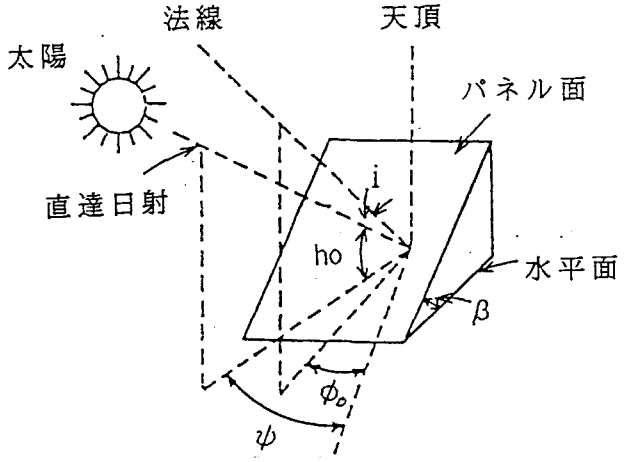


図２－９　太陽電池の水平面日射量と月別発電出力



ｉ：パネル法線面に対する入射角

ψ：太陽方位角　β：パネル傾斜角

ｈ０：太陽高度　φ０：パネル方位角

図２－１０　太陽電池パネル面への日射に対する各種角度

表２－２　各種日射成分の算出例

月	I_{HS}	I_{HD}	I_{HT}	散乱光比	太陽高度 h_o	太陽方位角 ψ	太陽赤緯 δ
1	888	1332	2220	0.4	32.9	12.37	-20.9
2	1228.5	1501.5	2730	0.45	41.2	9.81	-12.95
3	1488	1612	3100	0.48	51.2	19.9	- 2.04
4	2029.9	1800	3830	0.53	62.8	23.1	9.48
5	2220.4	2049.6	4270	0.52	72.2	28.4	18.67
6	2918.4	1641.6	4560	0.64	76.8	27.1	22.96
7	2242	1558	3800	0.59	74.8	18.2	21.35
8	1918.8	1771.2	3690	0.52	67.3	25	13.67
9	1662	1108	2770	0.6	57	10.6	2.96
10	1321.6	1038.4	2360	0.56	45.3	12.68	- 8.59
11	758.4	821.6	1580	0.48	35.8	11.5	-18.3
12	643.7	926.3	1570	0.41	31	14.06	-22.93

I_{HS}、I_{HD}、I_{HT} [Kcal/m²·day]　h_o、ψ、δ [°]

表２－３　傾斜面日射量と傾斜角

β°	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計	比
0	222	273	310	383	427	456	380	369	277	236	158	157	3648	1
5	231	282	317	389	431	458	382	373	282	242	163	163	3713	1.018
10	239	289	323	392	433	458	383	376	285	246	168	169	3760	1.031
15	245	295	327	394	432	455	382	377	286	249	171	173	3787	1.038
20	250	300	330	394	429	451	379	375	287	251	174	177	3795	1.04
25	253	302	330	391	423	444	374	372	286	252	175	179	3783	1.037
30	255	300	329	387	417	436	367	367	283	251	176	180	3752	1.029
35	256	302	326	381	407	425	359	360	230	249	176	181	3702	1.015
40	256	300	321	327	396	413	349	351	275	246	175	180	3633	0.996
45	252	296	315	363	383	399	337	341	268	242	172	178	3546	0.972
50	248	290	307	351	368	383	324	329	261	236	169	176	3441	0.943
60	236	274	286	322	333	349	294	300	242	222	161	167	3183	0.873

I_P [10×kcal/m²·day]

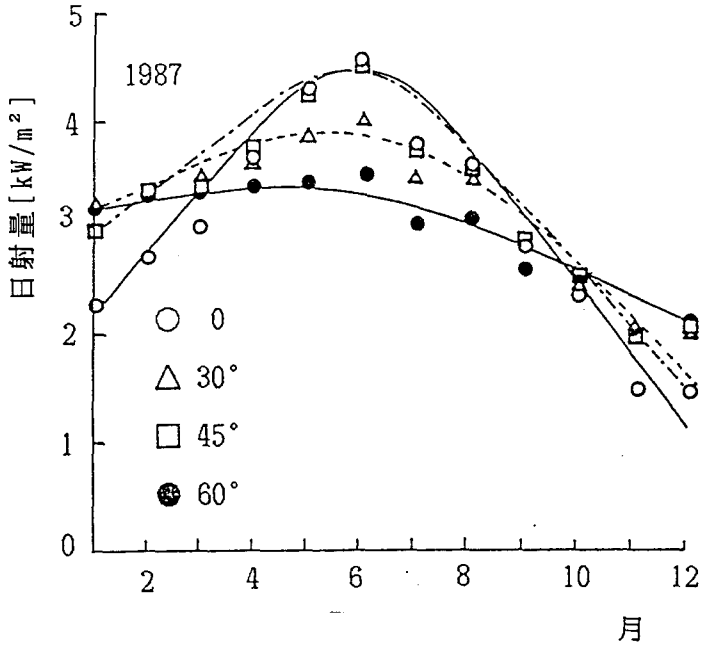


図２－１１　傾斜角に対する日射量

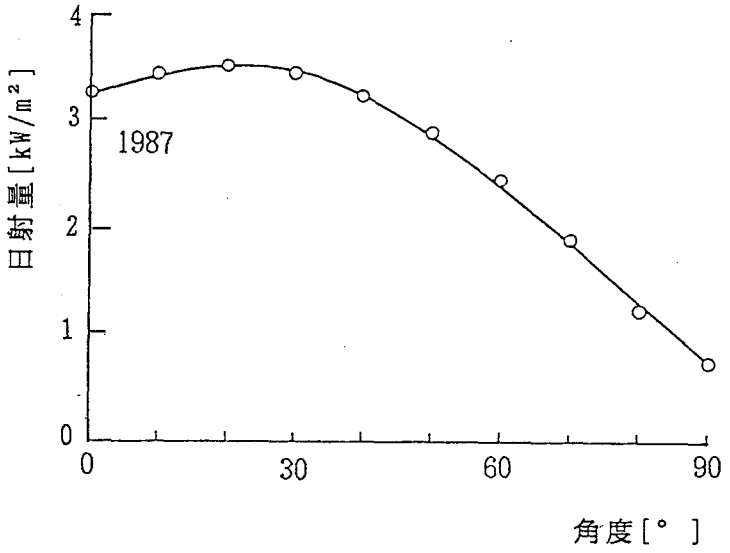


図２－１２　傾斜角の最適値

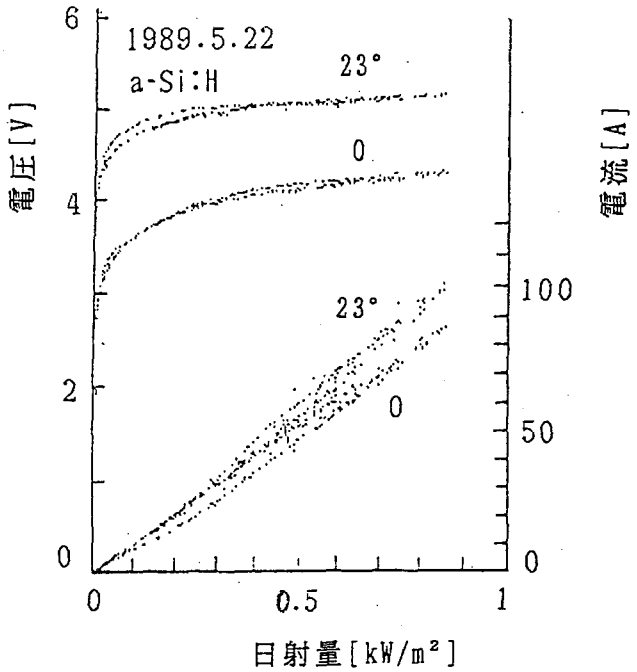


図２－１３　２３°の傾斜面と水平面における
開放電圧と短絡電流

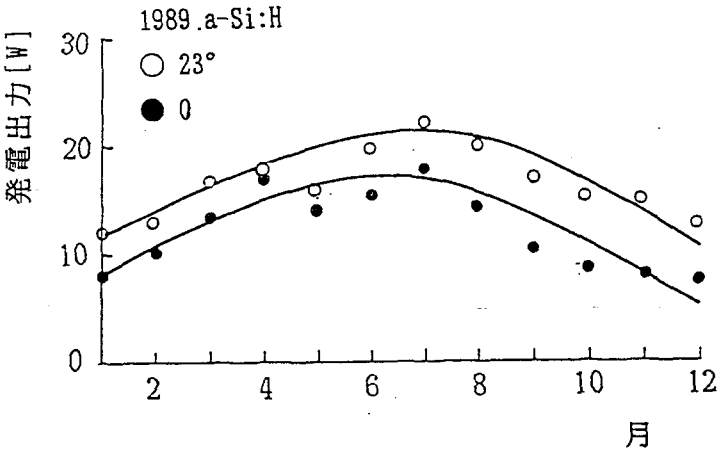
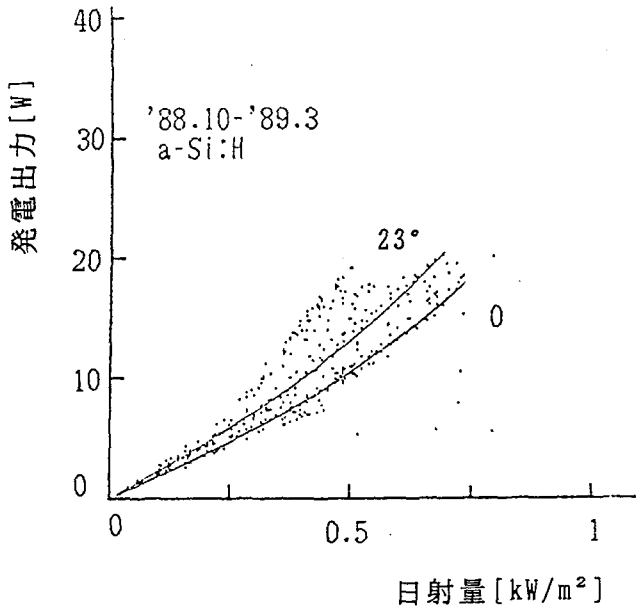
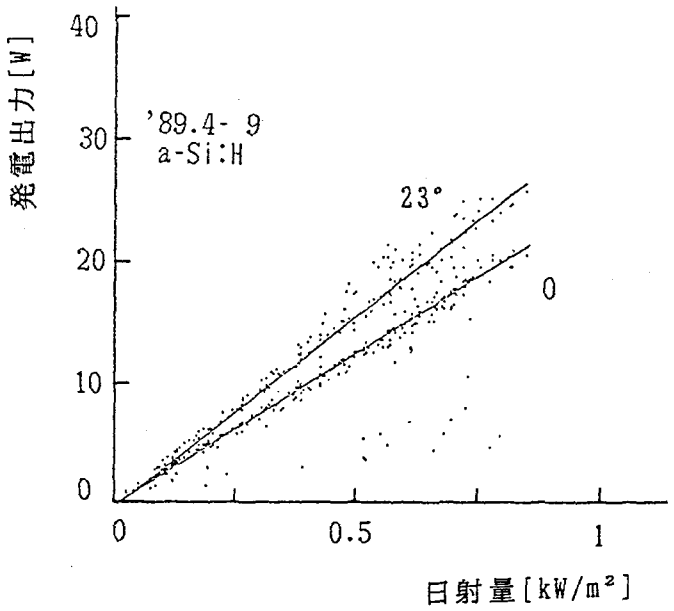


図２－１４　２３°の傾斜面と水平面の年間発電出力



（ａ）日射量の少ない季節



（ｂ）日射量の多い季節

図２－１５　季節変動面から見た発電出力

とは極めて難しい。このような変動を考慮して、常に最大出力点附近で動作させるには、太陽電池出力と負荷との間に通常、最大出力制御装置が挿入される。
ところが、制御装置のオン、オフ動作が太陽電池出力に振動電圧、電流を誘発し、時には異常振動を伴って誘導障害や太陽電池に悪影響を及ぼすことになる。
この現象を調査するために、太陽電池出力にチョッパ（図２－１７）を接続し、最大出力点附近において強制的に電圧変動与えて電圧－電流特性を測定した[7]。
測定は、太陽電池が実際に設置される状況を考慮して、次の方法により表２－１の試料を用いて行なった。

（１）太陽電池出力端と制御装置間のリード線を極力短かく、またリード線のインダクタンス（L_a）を極力小さくするためにリード線をより線にして行った。

（２）実際のシステムから推定されるリード線のインダクタンスを、太陽電池の出力端に挿入して行った。

図２－１８、１９は試料No.３に、２０［ｋＨｚ］～１６０［ｋＨｚ］の正弦波状の電圧振動を与えた場合の特性例である。また、いずれの特性も静特性上に動特性を重ねて表示した。振動周波数が２０［ｋＨｚ］程度になると、図２－１８（ａ）のように静特性と動特性に差異が現われはじめ、５０［ｋＨｚ］近く（ｃ）になるとその差異が顕著になってくる。この現象は試料No.４（ｅ）、No.５（ｆ）に対しても同様に観測された。これは、動特性が右回りのループを描くことから、太陽電池の接合容量C_j（図２－３）の充・放電々流が静特性に重ねられたものと考えられる。静特性上を移動した時と動特性上で動作した時の太陽電池出力は、１サイクル平均を考えれば変動幅が大きくない限りあまり変らない。
しかし、リード線のインダクタンスが無視できなくなる場合、C_jとL_aとによる共振々動がスイッチング毎に生じ、動特性は静特性上からはみだし、電圧・電流に大きな振動が生じるようになってくる。電流の振動周波数より、試料No.５（表２－１）における太陽電池の等価接合容量C_jを求めると０．０１［μF］となる。
接合容量は太陽電池の種類や製造方法、モジュールの直・並列個数などによって大きく異なる。また、インダクタンスはリード線の長さや太さなどに影響される。振動現象を抑制する対策として、C_jよりも５～６倍大きな容量のコンデンサを太陽電池出力端に並列に挿入すれば振動電圧・電流はほとんど現れない。

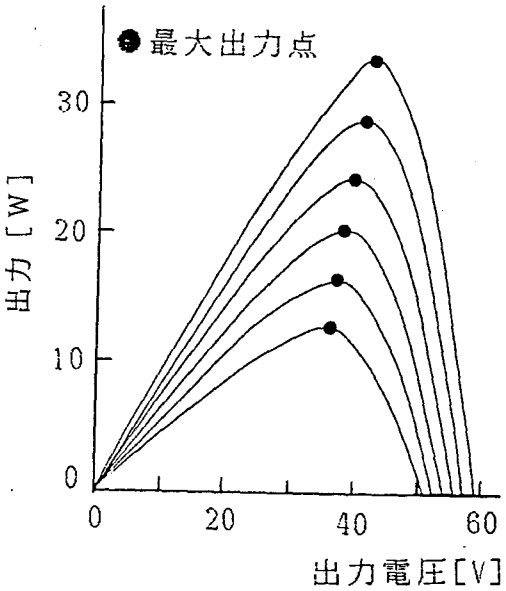


図２－１６　太陽電池の出力特性例

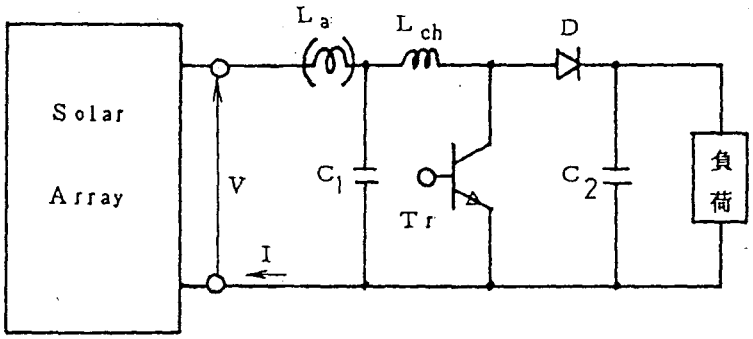


図２－１７　チョッパ回路

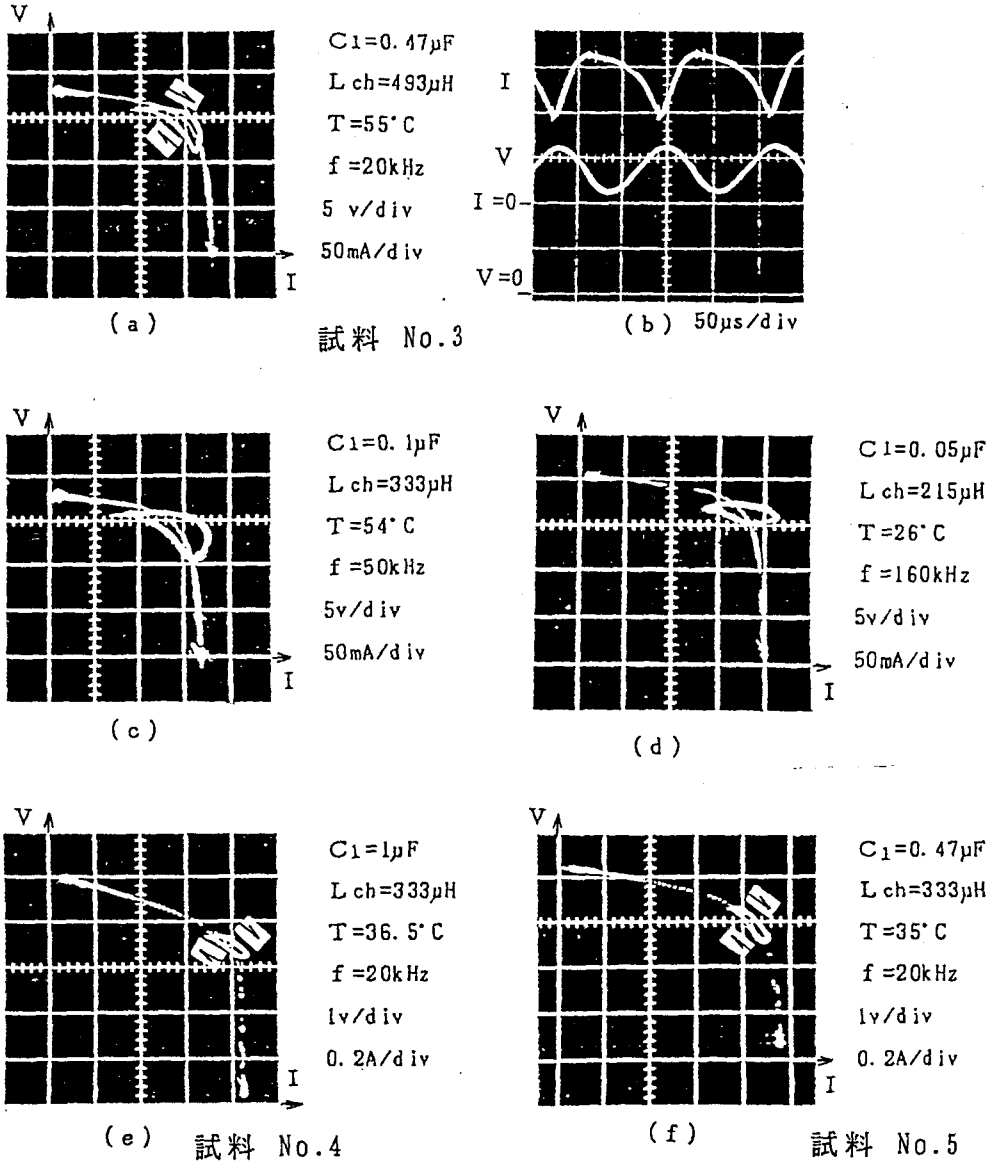


図２－１８　リード線のインダクタンスを極力小さくした場合

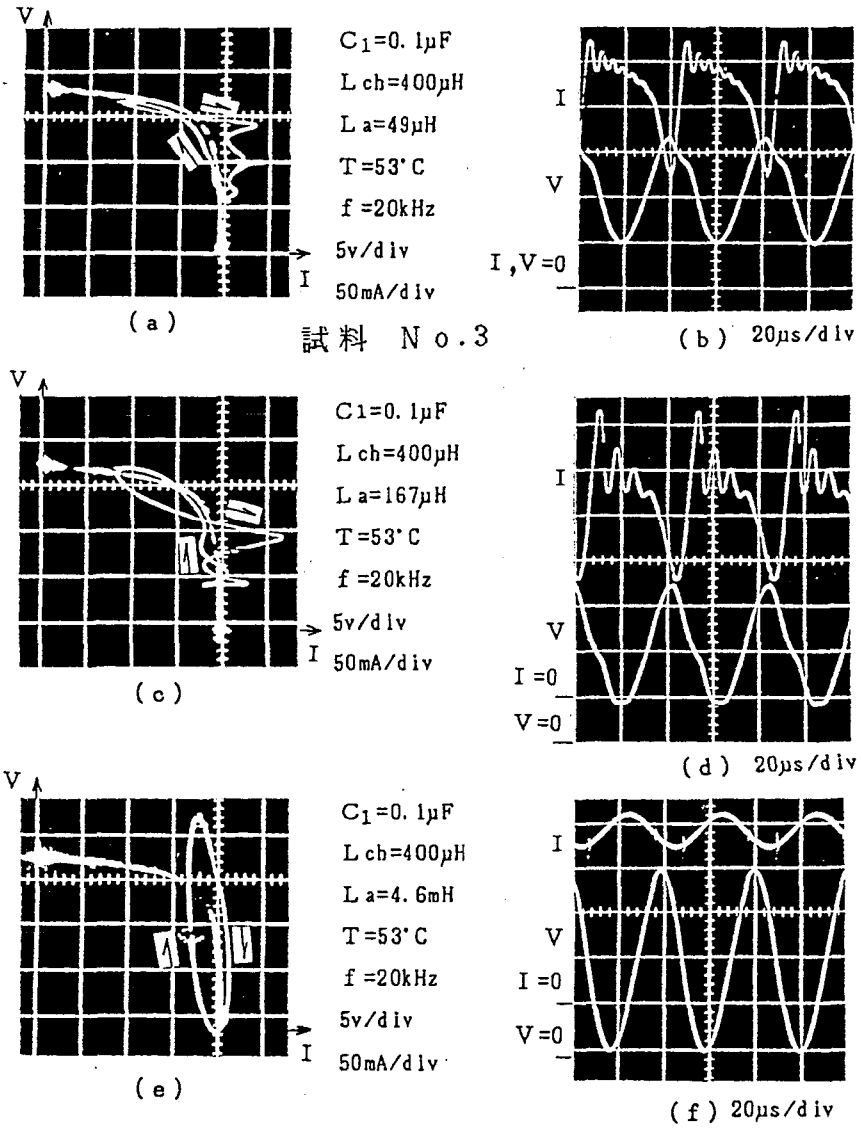


図２－１９　リード線のインダクタンスＬａを含めた場合

２・５　遮光による影響

モジュールの一部分（セル）が影に覆われた場合、全体の発電出力にどのような影響を及ぼすかを調査するため、表２－１に示すモジュールＮo.３、４の一部分を完全に遮光して行った。図２－２０は遮光した場合のＶ－Ｉ、Ｖ－Ｐ特性を、２．６節で述べる太陽電池出力簡易測定器を用いてオシロスコープ上に描いたものである。（ａ）の試料はセルが直列接続されたもので、（ｂ）は並列接続されたものである。表２－４は、全体の発電出力と遮光された場合の最大出力（Ｐmax）を示したもので、遮光されることによって約４０％近い発電出力が失われる。

さらに、発電が停止したセルの両端には、V_R＝（ｎ－１）V_{oc}（V_{oc}：各セルの開放電圧）の逆電圧が印加される（図２－２１）。この逆電圧がセル両端に印加され、それにより生じる電流がセル温度を急上昇させ、時にはセルを損傷に導くこともある[11][12]。このような原因からセルを保護するには、セル毎に並列にバイパスダイオードを挿入するか、あるいはモジュール毎に１個のバイパスダイオードを挿入する方法が有効である。

２・６　太陽電池出力の簡易測定器

太陽電池モジュールは通常、出荷時に屋内において人工太陽光下でモジュール特性を測定し出荷される。しかし、運搬時や据えつけ工事中に生じる特性変化や損傷状態あるいは、モジュール特性の不整合などによる出力低下を現地に据えつけた状態で直接評価できれば、生産者と発注者間に生じるトラブルや建設工事の長期化などの原因が解消される。

このような観点からこれまでに、

①基準状態とオンサイト条件の違いをレファレンスモジュールを用いて対比データとして測定し、アレイ出力測定値（Ｖ－Ｉ特性）を換算・補正するレファレンスモジュール方式[13]。

②コンデンサーを負荷として太陽電池の出力電圧を充電させ、開放電圧になった時点で測定を終え、測定されたデータをコンピュータで処理するコンデンサー充電方式[14][15]。

などが提案されている。①項では日射量、温度などの変動に影響されやすく、②項は日射量、温度などの変動に影響されず短時間に測定できることから最適であるが、データの解析にコンピュータを必要とする。

本装置の特徴は、トランジスタを活性領域で動作させることによって負荷特性がリニヤーに変化することを利用している。ベース電流を太陽電池の静特性上に（図２

－２２）そって連続的に変化させることによって、瞬時にオシロスコープ上にＶ－Ｉ特性を描かすことができる[16]。装置は図２－２３に示すように可変抵抗R_L（トランジスタ）と制御回路IC_1および電力算出回路IC_2から構成されている。測定時間は約１［分］、精度は約３％（オシロスコープの読取りに対して）、測定範囲は負荷となるトランジスタの最大コレクタ許容損失で決り、動作温度は－４０～１２０℃である。Ｖ－Ｉ特性を測定する場合は、R_1の端子電圧とモジュール電圧V_sで、Ｖ－Ｐ特性はIC_2の出力電圧V_o（R_1の端子電圧とV_sの積）とV_sをオシロスコープで観測すれば得られる。得られた波形をストレジ・スコープに取込み。、ＧＰ－ＩＢを介してコンピュータで処理すれば出荷時と経年変化時とのデータを比較検討することも可能である。

ＩＥＣ規格ではＡＭ１．５において、快晴時の光強度が約１００[mW/m²]（温度２５℃）を標準日射量としている。本試作装置の性能測定もこれに準じ、ＡＭ１の快晴状態で行なった。①は水平面日射量が９８[mW/m²]、②、③はそれぞれ、７８、６２［mW/m²］時における測定例を図２－２４（ａ）のに示す。測定は短時間で済むことから周囲温度（測定時３１～３３℃）の影響は受けない。

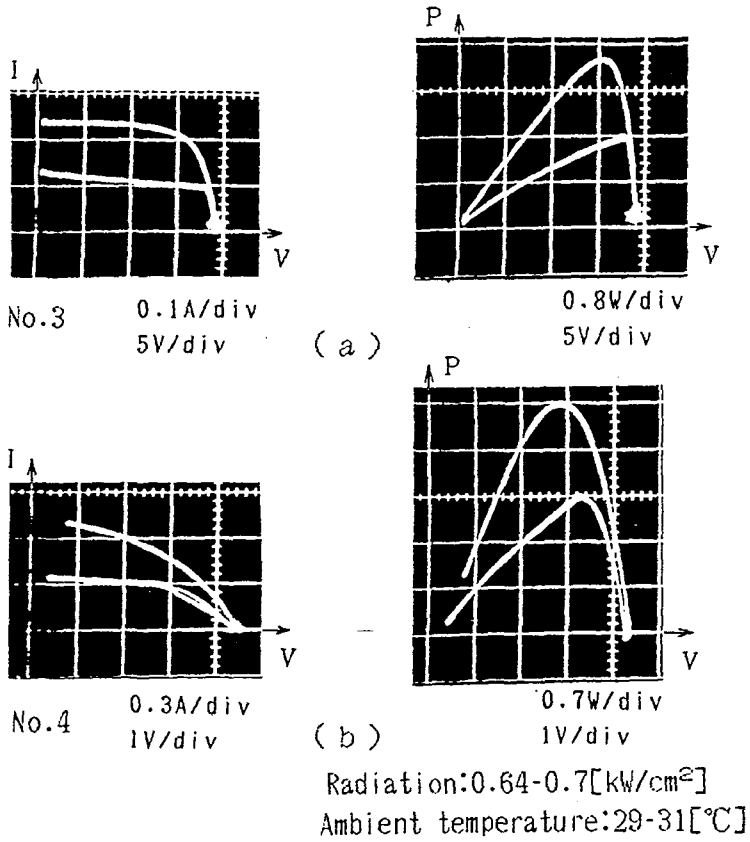


図２－２０　影による影響

表２－４　影の有無による最大出力

Sample	Pmax[W]	
	NO	Few
No.3	3.15	1.8
No.4	3.5	2.1

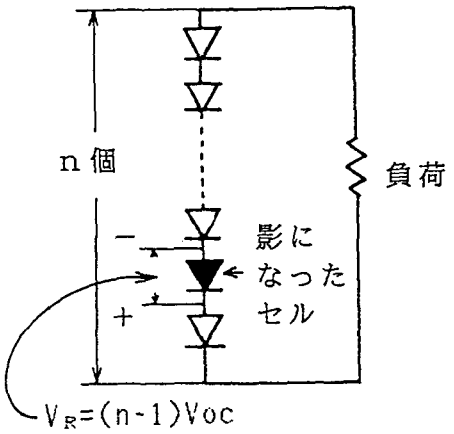


図２－２１　影になったセルに加わる電圧

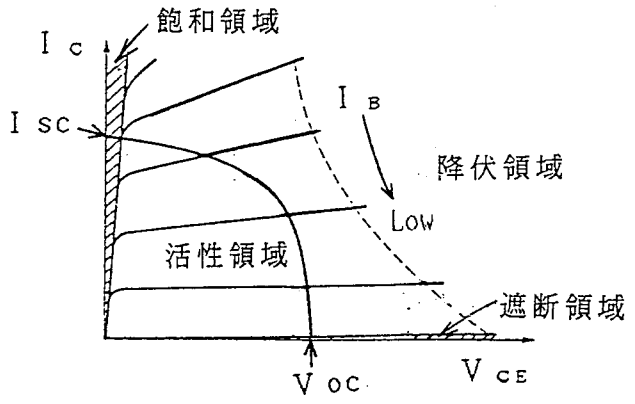


図２－２２　トランジスタおよび太陽電池の静特性

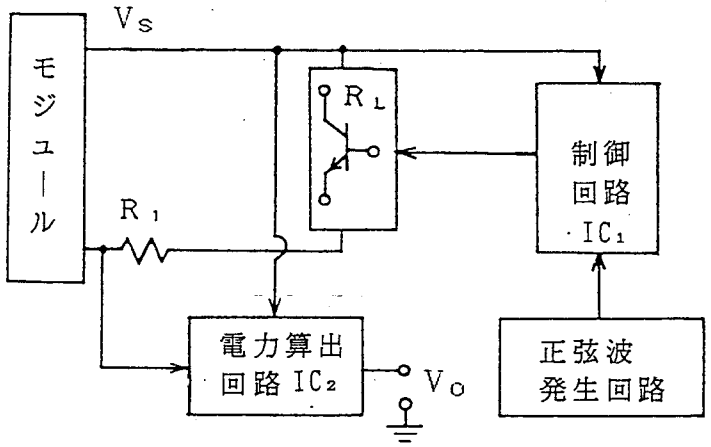
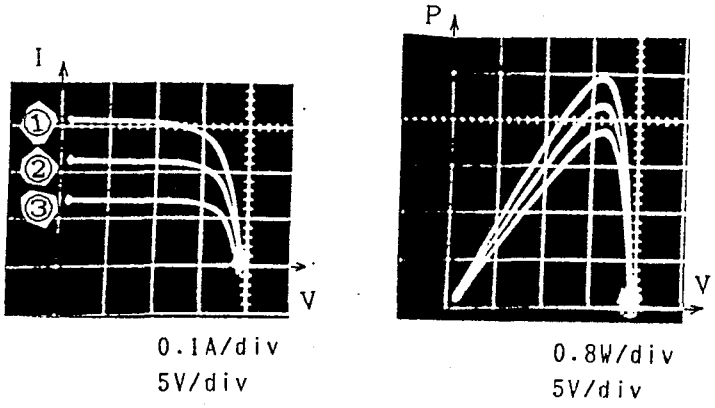
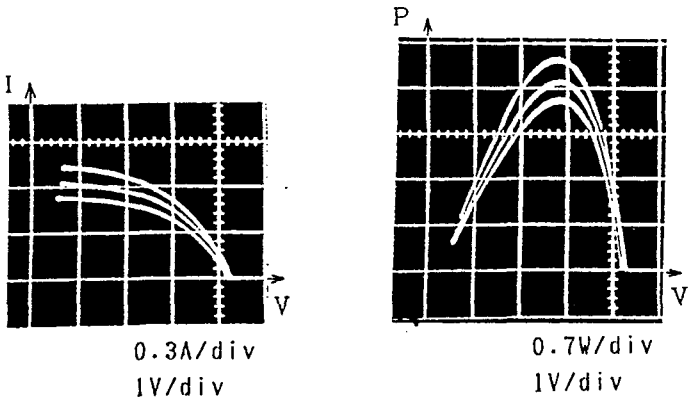


図２－２３　装置の回路構成



（ａ）試料Ｎｏ．３



周囲温度：３１～３３［℃］

（ｂ）試料Ｎｏ．４

図２－２４　試作装置によるＶ－Ｉ測定例

２・７　まとめ

太陽電池モジュールは、日射量や日照時間、緯度、温度および方位や影などの影響を受けて出力特性が大きく変化することから本章では、これらに関する基本的な諸特性について研究を進め、太陽光発電システムを設置する際必要となる各定数を算出し、設計への指針を与えてきた。

太陽電池は通常適当な傾斜角を設けて設置されるが、設置場所の緯度によりバラツキが生じる。ＨＡＰＳの気象データを用いて算出した各地域における傾斜角の最適値は、緯度角から１１°を引いた角度が最適となる。例えば、緯度が３２°４９″の熊本における傾斜角の最適値は２０°付近にある。このように水平面に対して、最適な傾斜角を設け太陽光発電システム設置すれば、年間約１７．５％も多く発電出力を得ることができる。

雲や建物、樹木などの影響でセルの一部分が遮光されると、全体の発電出力を４０％近く減少させるばかりでなく、遮光されたセルには高い電圧が逆方向に加わり、セルの逆耐電圧を越えると電流が集中して流れ（Hot spot）、セルを破壊に導くこともある。この現象を抑制する対策として、セルと並列に個々にあるいは各モジュール毎にバイパスダイオードを挿入すれば、セルを保護することができる。

太陽電池出力は気象条件に左右されることから、これに対応するために負荷との間に最大出力制御装置が挿入される。制御装置はオン・オフ動作時に、配線のインダクタンスL_aと太陽電池モジュールの接合容量C_jの共振による振動電圧・電流がモジュール出力端に発生し、条件によって異常に大きな振動電圧・電流が生じて誘導障害の原因ともなる。

このような振動現象を防止する対策として、太陽電池端から負荷までの配線長をできるだけ短くかつより線とし、モジュールを直列にしてから並列接続して接合容量できるだけ減少させるなど十分注意を払って設置しなければならな。それでも振動現象が生じる場合は、振動周波数に応じてモジュール出力端に、接合容量C_jの数倍のコンデンサを挿入すれば完全に振動を防止できる。

一方、太陽電池の出力特性を設置場所で簡単に測定可能な簡易測定器（テスター）を試作し、設置時に生じる物理的変化による特性のバラツキや遮光されたセル両端に発生する逆電圧、あるいは光照射によって出力が低下していく劣化特性などの測定に用いた結果、良好なＶ－Ｉ、Ｖ－Ｐ特性曲線をオシロスコープ上に描かすことができた。

参考文献

(1) 逸見：太陽電池の出力特性に関する研究 太陽エネルギー学会論文誌 Vol.18-1 1992

(2) J.Itsumi：A Study on the Output power Degradation of Solar Battery INREC'90 E-13 1990

(3) 滝川、武田：太陽光発電特性の素子温度依存性 電学全大 1069 1982

(4) 山上、黒川、谷：新型太陽電池モジュールの温度特性に関する一考察 電学全大 1179 1985

(5) 太陽電池エネルギー利用システムの現状と将来：電気学会技術報告（II）第26号 1988

(6) 熊野、他：離島用太陽光発電システムの運転 電気学会新・省エネルギー研究会 ESC-86-14 p49-58 1986

(7) 逸見、岩堀、山形、池田：自然環境エネルギー発電システムに関する研究 電学論 Vol.107-B 1987

(8) 柴田、内島編：太陽エネルギーの分布と測定 日本分光学会測定法ｼﾘｰｽﾞ15 1987

(9) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギーの基礎と応用 オーム社 1980

(10) 高橋昌英：１ＭＷ級太陽光発電システムの設計とその実証に関する研究 博士論文 1991

(11) 武田行弘：Ｓｉ太陽電池の実用化研究 電学全大 S.5-4.1982

(12) 高橋、吉田、米井、大木：太陽電池電源システムの遮光に対する性能（Ｉ） 電学全大 1191 1987

(13) 下川：太陽電池の光電物性と測定・評価に関する研究 電総研研究報告 880号 1987

(14) 黒川浩助：太陽光発電技術の標準化検討の現状と問題点 電気学会新・省エネルギー研資料 ESC-88-4 1988

(15) 長島：太陽電池評価システム 英弘精機（株）1989

(16) 逸見：太陽電池の出力特性を短時間に評価する測定法に関する考察 太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究会 6 1988

第３章　アモルファス太陽電池の光誘起劣化現象の抑制方法

３・１　序

太陽電池のチャンピオンとして将来性の高いアモルファス太陽電池は、光照射による出力低下が電力用として実用化するための重要課題となっている。この現象は設置直後に受ける太陽光線によって数週間で十数％近い発電出力を低下させる初期劣化（Staebler・Wronski）[1]、および日射量と日照時間とによって少しづつ低下していく二次劣化である。このような光劣化の進行を抑制する方法として、ｉ／ｎ界面でのキャリア再結合の抑制[2][3]、膜特性の制御や有効なパッシベーションの採用など物性面から[4][5]、また構造面では、２層あるいは３層タンデム形や光とじ込め形などの研究開発が進められている[6]-[9]。

本章では、このような劣化現象を検討するために、屋外にアモルファス太陽電池および単結晶太陽電池を設置して経時変化特性の観測を続けてきた。その結果、光照射を受けて初期に大きく低下した発電出力が夏期に上昇、冬期に減少を繰り返しながら少しずつ低下していくデータが得られた[10][11]。この夏期の温度上昇によるアニール処理効果に着目して、太陽電池を外部から直接アニール処理する集光加熱装置を試作した。劣化したアモルファス太陽電池をケースに入れて集光点に設置しケース加熱した結果、発電出力を出荷時近くにまで回復できた[12][13]。
さらに、得られた結果より高い回復効果を得るには、処理温度と時間の他にアニール周期が重要であることから、シミュレーションにより長期劣化抑制法を検討した[14]-[18]。

３・２　経時変化特性

光照射を受けて光劣化が進行していくアモルファス太陽電池の開放電圧、短絡電流、温度、日射量を日の出から日没までの日照時間帯を３分間隔で自動計測し、次の方法で検討した。

①発電出力は雨天、曇天日を除いて１日の日照時間帯を積分して算出し月毎に合計した。

②変換効率は日射計で測定した１日の日射量の積分値と発電出力とから求めた。

図３－１（ａ）（ｂ）は、８６年９月から９１年８月までに得られた発電出力と変換効率の経時変化特性である。９月に光照射を受けたアモルファス太陽電池の１ヶ月の平均発電出力１３［Ｗ］に対して、１０、１１月の平均出力は８［Ｗ］と３８％近く減少している。その後、日射量の増加と共に発電出力も増加し、８７年５月

～７月における平均出力は２２．７［Ｗ］と８６年９月の平均発電出力に対して約４３．７％とピークに達した後、減少していく。このようにアモルファス太陽電池の発電出力および変換効率は、太陽光スペクトルの季節変動とモジュール温度の季節変化による劣化および回復を繰返しながら少しずつ低下している。測定から１年ほど経た８８年冬期の発電出力を８７年同期と比較した場合約５［Ｗ］また、変換効率は０．８６［％］上昇している。さらに、８７年夏期における発電出力および変換効率には大幅な上昇が見られ８９、９０年同期にも上昇が見られる。高い上昇率を示した８７年夏期の気象状況は、夏期平均の日射量４［ｋＷ／ｍ²］を上回り５．２［ｋＷ／ｍ²］に、太陽電池の裏面で測定した温度は６０℃（内部では１００℃前後と思われる）に達していた。この高い温度により、８６年１０月～１１月にかけて光劣化した特性がアニール処理されて、光照射時に近い特性にまで回復したものと考えられる。

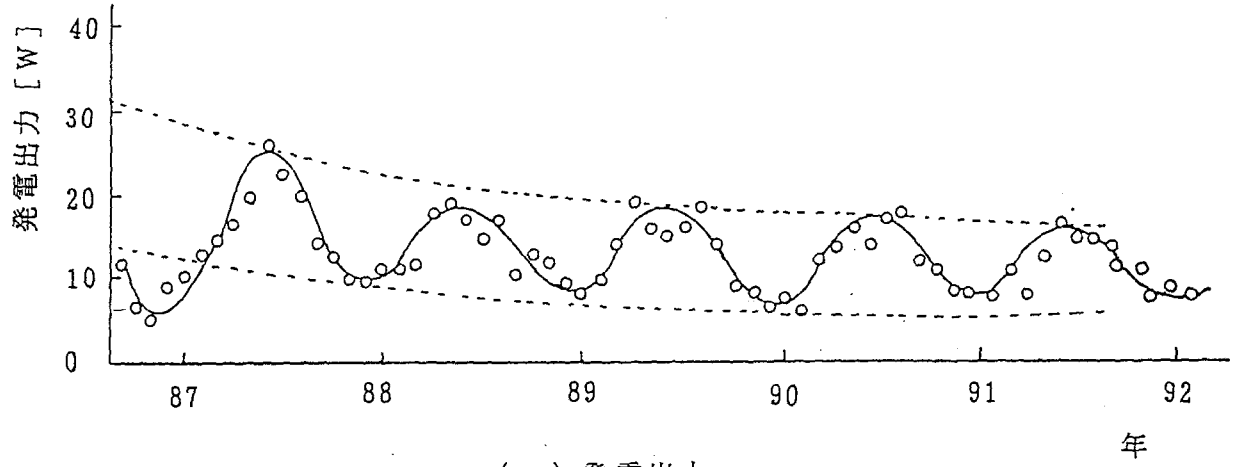
ここで、８６年９月と１０月に得られた１ヵ月の平均発電出力を、日射量および周囲温度がほぼ等しいとして求めた初期劣化率は１９．３％であった。また、二次劣化についてはさらに長期にわたる観測を必要とする。

図３－２（ａ）（ｂ）は、単結晶太陽電池の発電出力と変換効率の経時変化特性を示したもので、測定開始から９１年８月までのデータには劣化現象は見られない。

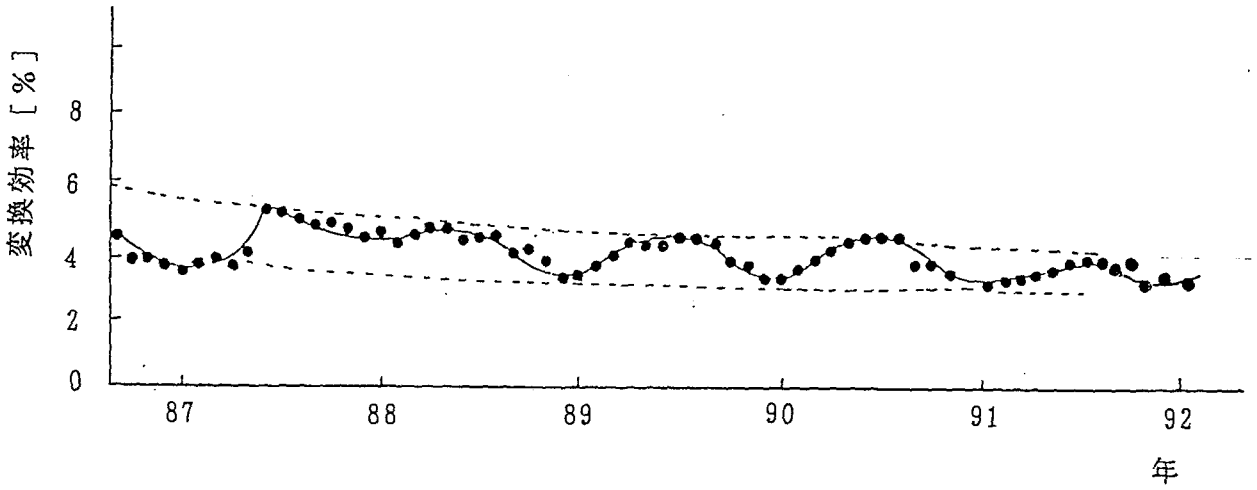
表３－１は測定に用いた太陽電池の仕様である。

表３－１　太陽電池の仕様

試料番号	開放電圧 Voc[V]	短絡電流 Isc[mA]	最大出力 Pmax[W]	変換効率 η[%]	種類	面積 [cm²]
No.1～3	5.1	98	0.44	6.4	a-Si:H	100
No.4	5.1	95	0.43	6.4	〃	〃
No.5～7	5.1	95	0.43	6.4	〃	〃
No.8	5.1	98	0.44	6.4	〃	〃
No.9	0.56	1[A]	0.45	9.1	C-Si	78.5

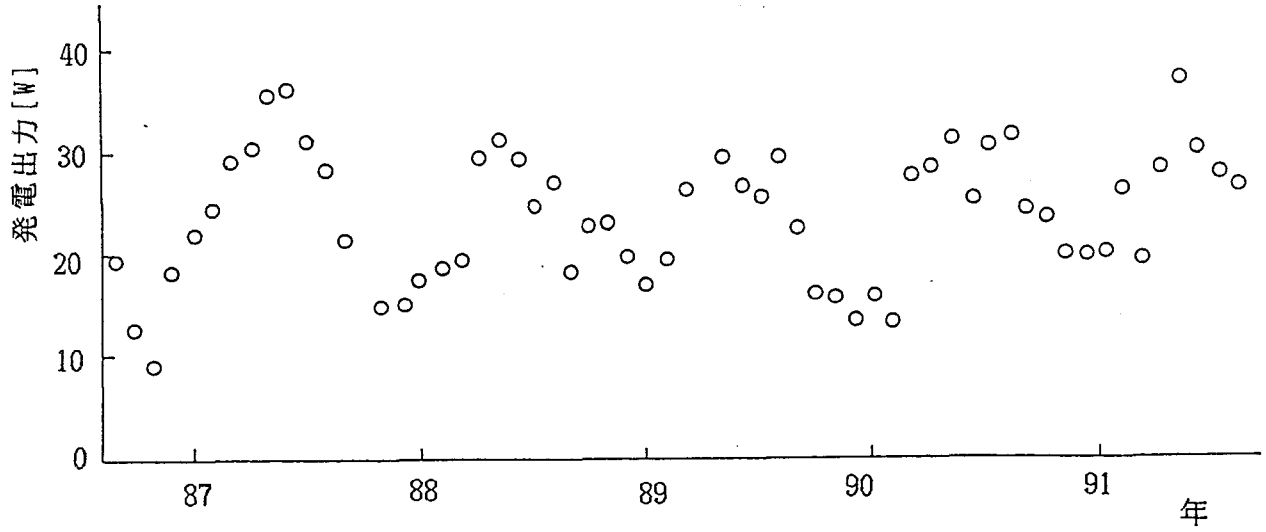


（a）発電出力

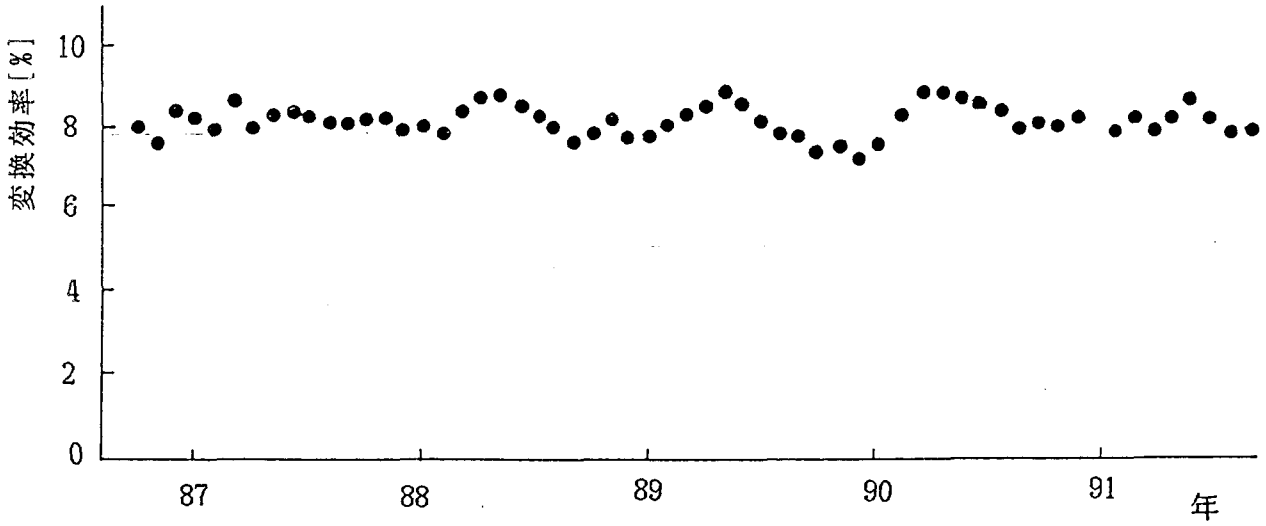


（b）変換効率

図３－１　アモルファス太陽電池の経時変化特性



（ａ）発電出力



（ｂ）変換効率

図３－２　単結晶太陽電池の経時変化特性

３・３　アニール処理方法と処理後の特性

光劣化が進行しているアモルファス太陽電池の劣化が止る原因として想定されることは、①出力がほぼ零に近付いた時。②欠陥の発生が何等かの原因により止った時。③劣化速度と熱による回復速度とがバランスした時。①②については、太陽電池の内部構造そのものに原因することから第三者にはどうすることもできない。

本研究は、５年間にわたって観測してきた経時変化特性結果より、夏期の温度上昇がもたらす加熱効果が劣化抑制に効果的に作用する現象に着目して、設置場所で短期間にアニール処理が可能な集光加熱装置の開発を行った。

集光加熱装置は、劣化したアモルファス太陽電池をケースに入れて集光点に置き、ケースを加熱することによって、アニール処理効果を引出すもので、通常行われている恒温槽内で行ったアニール処理結果と同等の効果を得ることができる。

図３－３（ａ）に示す集光加熱装置は、フレネルレンズ（30×40cm、焦点距離100cm、厚さ2mm）によって太陽光を集光し、集光点に劣化したアモルファス太陽電池を挿入したケース設置して加熱処理する方法である。太陽電池は開放状態で、ケースには、プラスチックおよびアルミケースを用いた。また、アニール温度の変化幅を±２℃に保つために、太陽電池の裏面に銅パイプを敷いて冷却し、風および反射熱、ふく射熱などの影響を避ける目的で装置全体をフードで囲って行った。

さらに、集光加熱法で行ったアニール処理結果を比較検討する目的で、同図（ｂ）に示す恒温槽を用いて、劣化したアモルファス太陽電池（開放状態）のアニール処理行なった。アニール処理温度の測定は、集光加熱装置では太陽電池の裏面とケースの内外側で、恒温槽内では太陽電池の表面で測定した。

アニール処理手順は、図３－４に示すようにアニール処理温度一定の下で、３０分間あるいは６０分間アニール処理を行い処理後、強制冷却して裏面温度が３５℃前後に下がった時点で、２・６節で開発した簡易測定器を用いて電圧－電流、電圧－電力特性（図３－５）の測定を行った。測定時における日射量は０．７～０．８［ｋＷ／ｍ^2］、冷却および測定に要する時間は５～６分。測定後、再びアニール処理を数回繰り返し、発電出力が最大値に達した時点から減少傾向を示すに至った時点でアニール処理を中止した。

図３－６は、集光加熱装置を用いたアニール処理結果である。５年間の光照射によって発電出力が０．２２［Ｗ］に低下した、試料Ｎｏ．１のアモルファス太陽電池をＡ１（アルミ箱）ケースに入れて、９０±２℃（○印）の温度下でアニール処理した特性である。発電出力はアニール時間に比例して増加し、１８０分附近で最大値（０．２９４［Ｗ］）に達している。●印は、１００±２℃の温度下でアニール

処理しＮｏ．２の結果で、１２０分附近で最大値（０．２８［Ｗ］）に達している。▲印は、試料Ｎｏ．４をプラスチックのケースに入れて、１００±２℃の温度下でアニール処理した特性である。

同じアニール温度下でケース替えてアニール処理したＮｏ．２とＮｏ．４とを比較した場合、最大値の発電出力は約８％増加し、アニール時間も３０分ほど短縮される。Ａｌケースは、ケース自身を加熱後内部温度が上昇し始めることおよび放熱がプラスチックに比べて大きいことなどが原因したものと考えられる。プラスチックケースを用いた方法は、ケースを通して集光された１２Sunの太陽光がアモルファス太陽電池の表面に入射してくることから、光と熱による加速劣化と回復効果とが同時進行することになる。入射してきた光がプラスチック内部と太陽電池表面間で反射を繰り返しながら内部温度を上昇させた分だけ回復速度が上回り、アニール時間が短縮され回復効果が高くなったと考えられる。最大出力点に達した時点で回復効果と加速劣化とがバランスし、さらにアニール処理を続けると加速劣化速度が回復速度を上回り発電出力は低下傾向を示す。

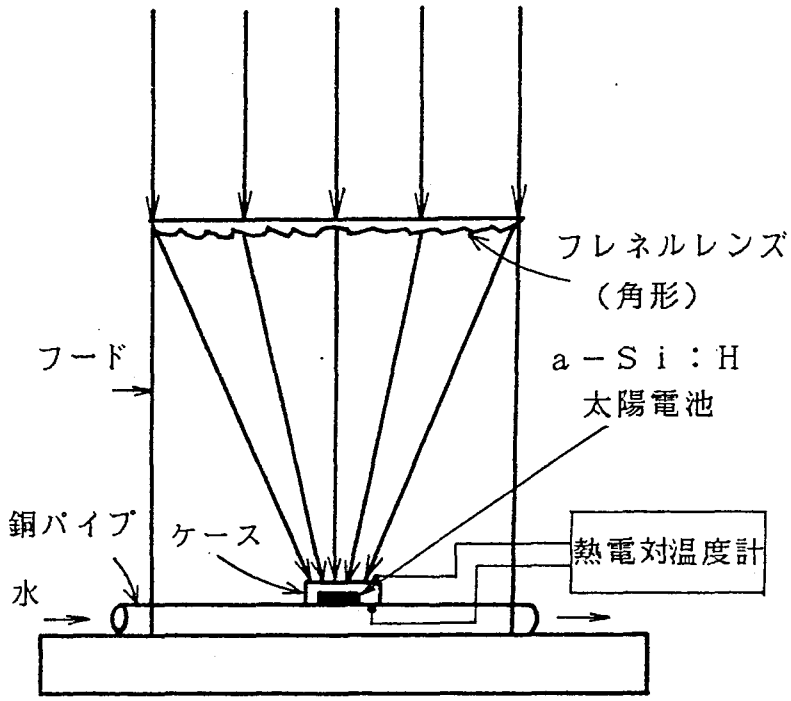
通常行われている光密度パルス光による加速劣化は、２０Ｓｕｎ以上のパルス光を数時間にわたって、開放状態の太陽電池に直接照射して行なわれている。集光加熱法では、１２Ｓｕｎの連続光を３０分間あるいは６０分間にわたって、ケースを加熱してアニール処理していることから、回復速度が劣化速度を上回った状態と考えることができる。

図３－７は恒温槽内部でアニール処理した試料Ｎｏ．５～８のアニール処理特性である。温度によってアニール時間が短縮され発電出力も増加して、集光加熱法に比べて高い回復効果が得られている。また表３－２は、加熱法および恒温槽内で行ったアニール処理結果をまとめて示したものである。

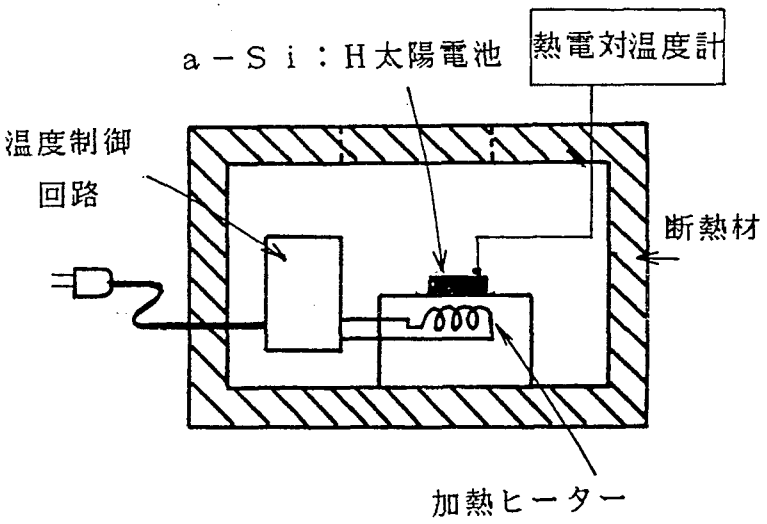
試料Ｎｏ．３は、設置時における発電出力は０．４４［Ｗ］、５年間の光照射後の出力は０．２６５［Ｗ］と約６０％近くにまで減少している。同試料をアニール処理温度１１０℃で１２０分間アニール処理した結果、０．３１５［Ｗ］約７２％台にまで回復している。また、試料Ｎｏ．８を１００℃で１２０分間アニール処理した結果、７６．１％台にまで回復する。

このように１００～１１０℃の温度下で１２０分間アニール処理すれば、光劣化の進行をある程度くい止めることができる。しかし、長期間の光照射によって回復率が最も低い試料Ｎｏ．６では６３．６％、最も高い試料Ｎｏ．５でも７６．７％と、いずれにおいても回復率は低い。回復率を高くするには、次節で述べるアニール周期の影響が大きく関わってくると考えられる。

低温下におけるアニール処理効果は、キャリヤが再結合される際に放出するエネルギーによって切られていたｉ層中の弱いＳｉ－Ｓｉ結合（Weak-bond）のダングリングボンドの再結合あるいは、格子振動が活性化されて、水素がダングリングボンドを埋めて電気的特性を良くするなどの説がある[7]-[11]。
しかし、これらに関しては現在、各方面で多くの議論がなされている段階であり合意は得られていない。尚、ここに用いたアモルファス太陽電池は１９８６年以前に製造されたもので、現在の初期劣化率は１０％前後にまで改善されている。



（a）集光加熱装置



（b）恒温槽

図３－３　アニール処理装置

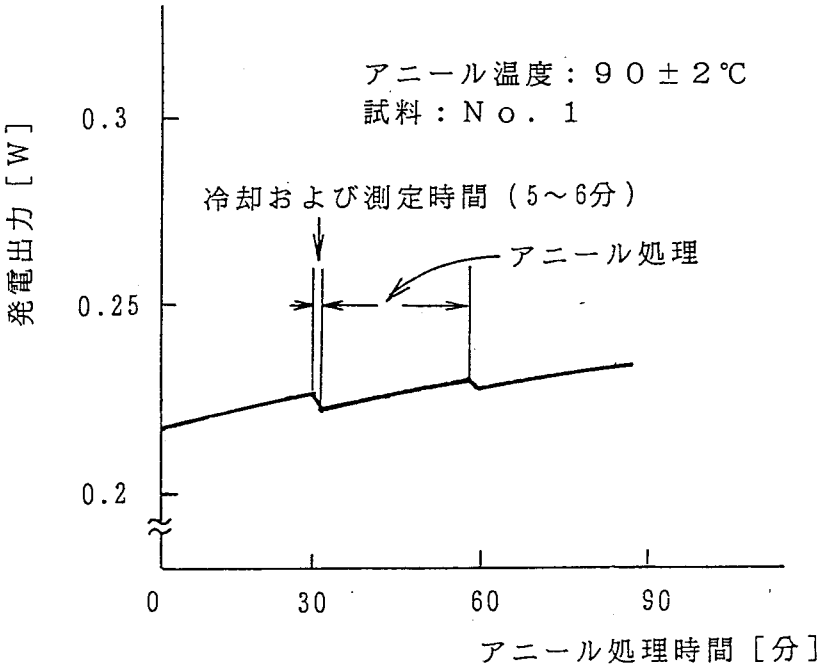


図３－４　アニール処理の方法

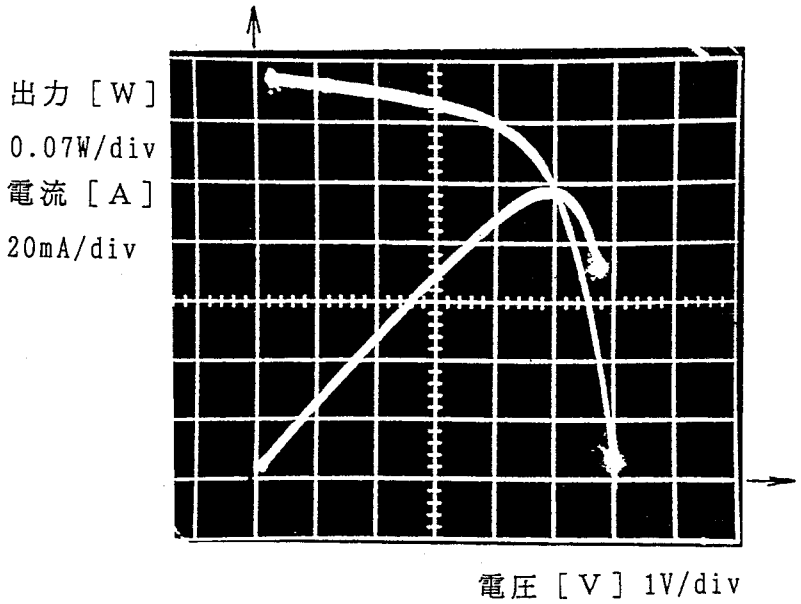


図３－５　アニール処理後の出力波形例

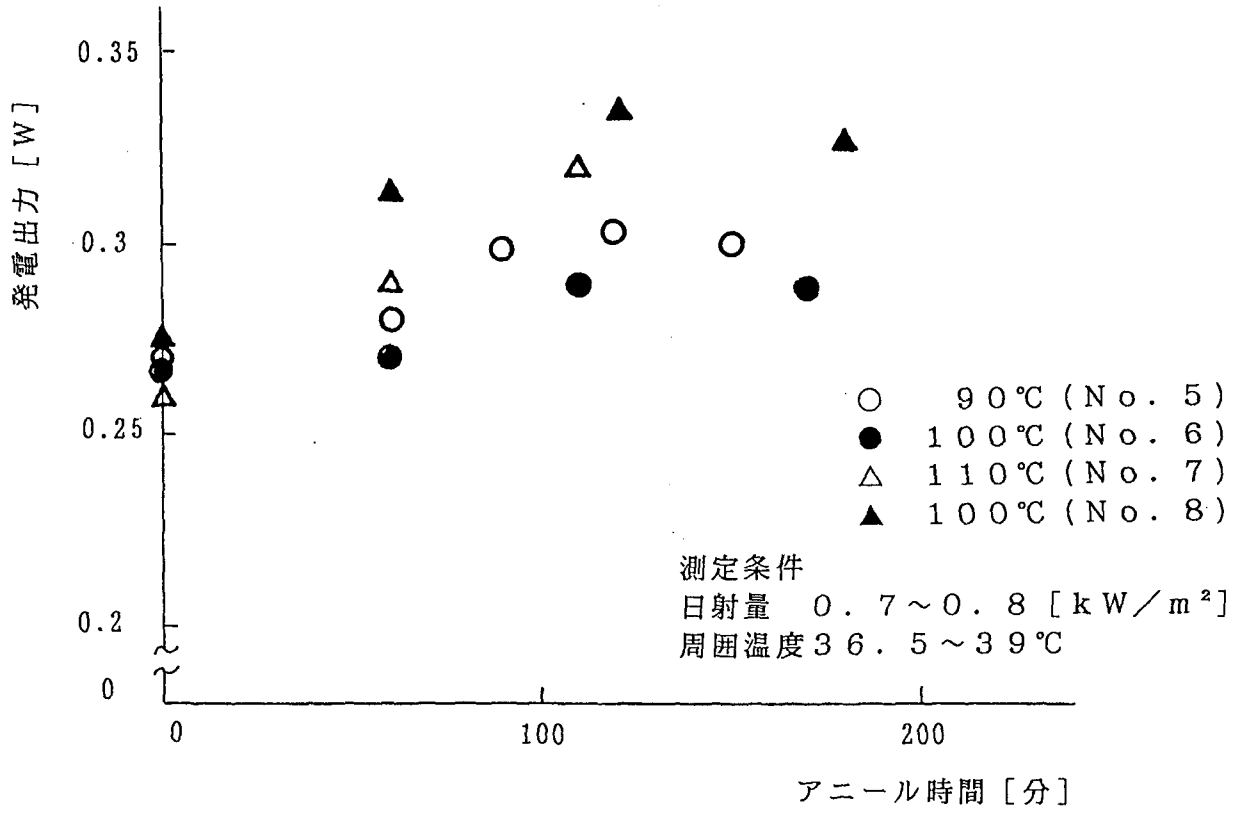


図3－7　恒温槽を用いたアニール処理特性

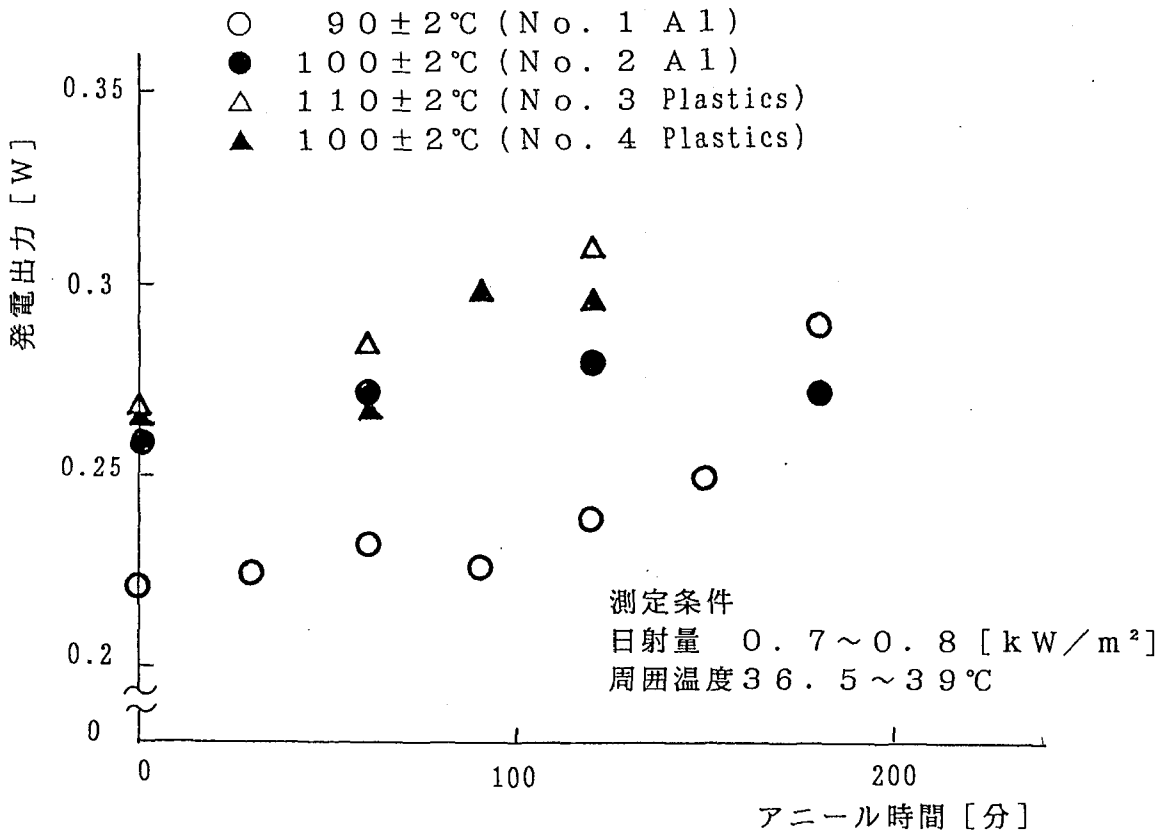


図３－６　集光加熱装置を用いたアニール処理特性

表３－２　各試料のアニール処理結果の比較

試料	86年9月における発電出力	91年8月時点の発電出力と低下率(%)	アニール後の発電出力	アニール時間・温度	アニール後の回復率[%]
No.1	0.44 W	0.22 W (50%)	0.29 W	180分 90℃	67
No.2	0.44 〃	0.258 〃 (58.6%)	0.28 〃	120〃 100〃	63.6
No.3	0.44 〃	0.265 〃 (60%)	0.315 〃	120〃 110〃	71.6
No.4	0.43 〃	0.265 〃 (61.6%)	0.3 〃	120〃 100〃	70
No.5	0.43 〃	0.27 〃 (63%)	0.33 〃	220〃 90〃	76.7
No.6	0.43 〃	0.27 〃 (63%)	0.29 〃	120〃 100〃	67.4
No.7	0.43 〃	0.26 〃 (60.5%)	0.317 〃	120〃 110〃	73.7
No.8	0.44 〃	0.275 〃 (62.5%)	0.335 〃	120〃 100〃	76.1
測定条件	100[mW/cm²] 25℃	70-80[mW/cm²] 35-39℃			

低下率は出荷時を１００％として表わした。

３・４　劣化抑制シミュレーション

２つのアニール処理結果より、高い回復率を得るには最適なアニール温度と時間を設定すればよいことが明らかとなった。しかし、光劣化の進行は、設置後の速い期間に大きいことから、光劣化を抑制するにはアニール温度と時間の他にアニール周期が重要となってくる。

アモルファス太陽電池の劣化過程は図３－８に見られるようにτ_1、τ_2の２つの期間が存在することから、規格化発電出力は（３－１）式で与えられる[19][20]。

$$P_{(t)}/P_{(0)}=C_0-C_1(1-e^{-t/\tau_1})-C_2(1-e^{-t/\tau_2}) \qquad (3-1)$$

τ_1は初期劣化期間で（１１～１４days）、τ_2は２次劣化期間（２２０～６８０days）を示している。C_0、C_1、C_2は定数である。また、図３－９にはアモルファス太陽電池の出荷時における発電出力（$P_{(0)}$）と光照射を受けて低下していく出力（$P_{(t)}$）比と照射時間の関係を示した。

ここではτ_1に注目して、５年間にわたる屋外暴露試験データと集光加熱法によるアニール処理結果といくつかの仮定をもとに、最適なアニール処理期間についてシミュレーションを用いて論じる。

①光劣化の進行を減衰定数λの関数$f(n)=\exp^{-\lambda t}$とする。

②アニール処理後は減衰の度合いが大きくなる（初期劣化）ので、減衰定数λをアニール処理回数ｎの等差数列とする。

$$\lambda_n=\lambda+(n-1)\gamma \qquad (3-2)$$

ただし、λ：減衰定数、γ：増加因子

③回復率αをアニール処理回数ｎの減衰関数とする。

$$\alpha_n=\alpha\cdot\exp^{-\beta_0(n-1)}+1 \qquad (3-3)$$

ただし、α（$1<\alpha<\exp^{\lambda t}$）：初期回復率

β_0：減衰因子（新たな欠陥部分の発生などによる）

以上の仮定により、光照射を受けて劣化が進行していたアモルファス太陽電池を１回目のアニール処理によって回復する劣化抑制特性$g(1)$は次式で与えられる。

$$g(1)=(\alpha+1)\cdot\exp^{-\lambda t} \qquad (3-4)$$

従って、ｎ回目のアニール処理によって回復する劣化抑制特性$g(n)$は、

$$g(n)=\prod_{\kappa=1}^{n}(\alpha_\kappa\cdot\exp^{-\lambda_\kappa\tau})$$

$$=(\alpha\cdot\exp^{-\beta_0(n-1)}+1)\cdot\exp^{-\{\lambda+(n-1)\gamma\}\tau}\cdot g(n-1) \qquad (3-5)$$

ただし、$g(0)=1$

の漸化式で表される。ここで、集光加熱法によってアニール処理した結果より、各

定数をλ＝０．０１、α＝０．３、β_0＝０．０５、時定数１／λ＝１００として、アニール周期５年（６０ヶ月）でアニール処理した場合の劣化抑制特性ｇ(n)と劣化特性ｆ(n)を図３－１０（ａ）に示す。特性より、シミュレーションによる回復率は６６．９％、また集光加熱法による試料Ｎｏ．１の回復率も６７％とほぼ同様の結果が得られた。しかし、長期間の光照射を受けたことにより回復しがたい欠陥部分の発生などから高い回復率は期待できない。

ここで、アニール周期を速めて３年４ヵ月（４０ヶ月）経過後、アニール処理を行えば回復率を８０％台にのせることも可能となる（ｂ）。さらに、図３－１１（a)に示すように、１年毎に発電出力の低下著しい１月頃にアニール処理すれば、出荷時近くにまで回復させることも可能で初期劣化率を１０％以下に押さえることができる。この時のｇ(n)／ｆ(n)比は、５年後には１．６倍、１０年後には２倍以上の発電出力をアニール処理により維持することができる。

また、同図（ｂ）は上昇中である５月頃に、（ｃ）は発電出力が低下し始める９月頃に年１回アニール処理した特性例で、１０年後のｇ(n)／ｆ(n)比はほぼ１．６倍および１．９倍近になる。また、表２－８に出力劣化率および１回目のアニール処理後の回復率をまとめて示した。

最適なアニール処理周期についてシミュレーショウを用いて行った結果より、光照射後速い期間にアニール処理を行えば、高い回復効果が期待できることを示した。いいかえれば、アモルファス太陽電池から長期間安定した発電出力が得られるこになり、電力用として十分実用化が可能なことを示した。

表３－３　出力の劣化率および１回目のアニール処理後の回復率

	アニール周期［ヶ月］				
	６０	４０	１２（図３－１１）（ａ）	（ｂ）	（ｃ）
劣化率[％]	48.8	60.5	87.1	87.1	87.1
上昇率[％]	66.9	80.2	96.9	93.7	95.7
回復率[％]	16.7	19.7	9.8	6.3	8.6

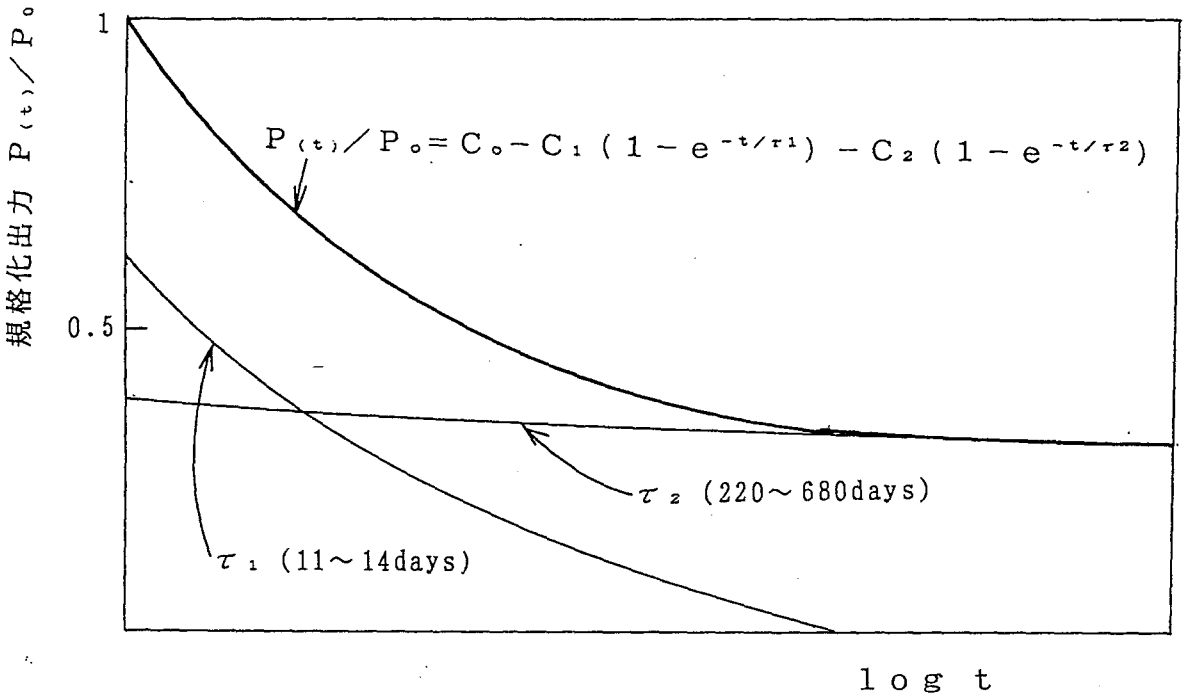


図３－８　アモルファス太陽電池の初期劣化期間τ_1と二次劣化期間τ_2

表３－４　各定数

i-layer thickness (Å)	τ_1 (day)	τ_2 (day)	C_0	C_1	C_2	$C_0-C_1-C_2$
2500	13.9	226	1.0	0.07	0.03	0.90
4000	13.1	270	1.0	0.09	0.06	0.85
6000	11.5	354	1.0	0.10	0.10	0.80
8500	11.2	679	1.0	0.14	0.17	0.69

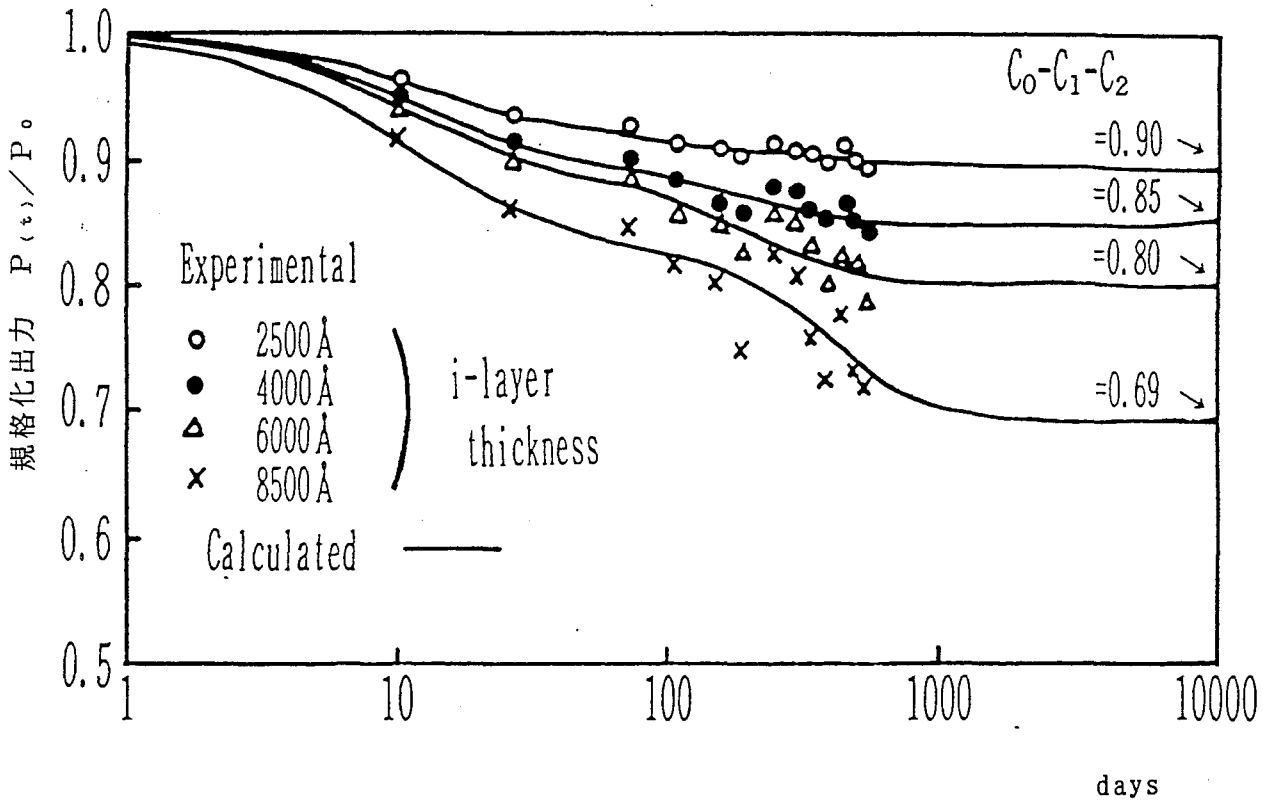
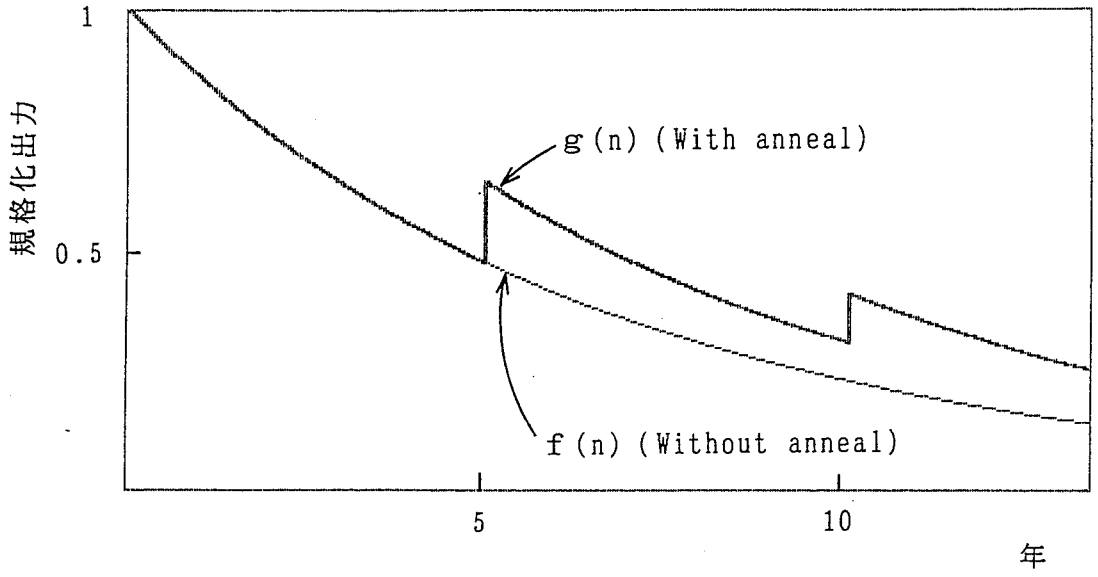
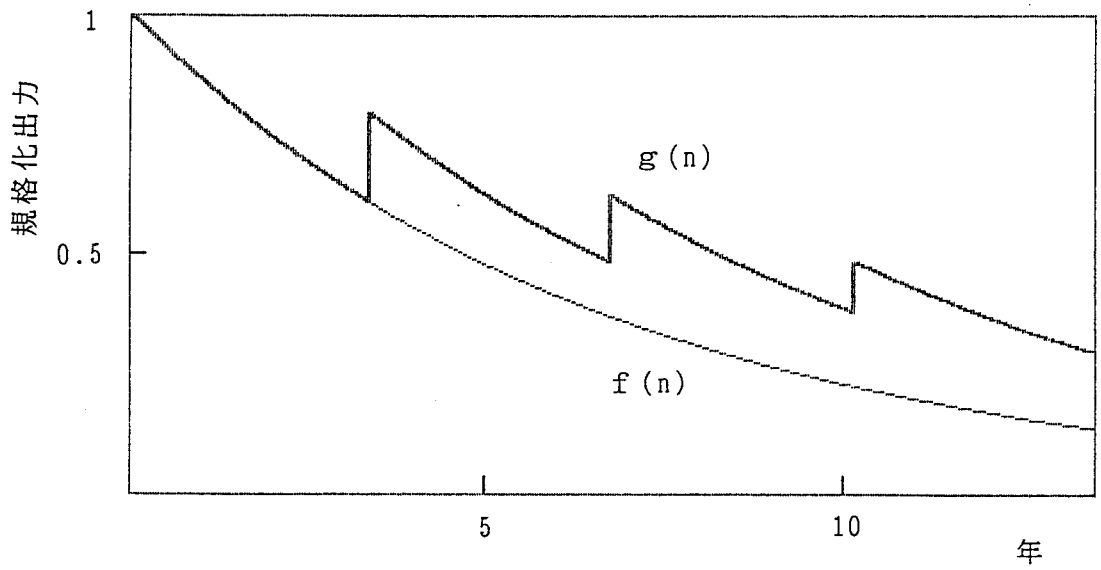


図３－９　アモルファス太陽電池の経時変化特性

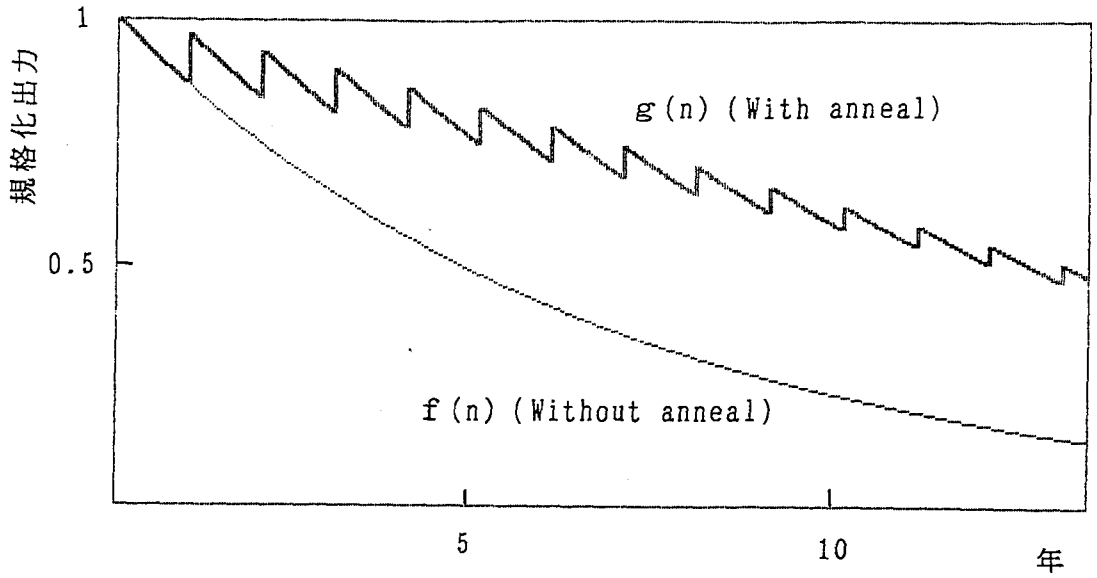


（ａ）５年（６０ヶ月）

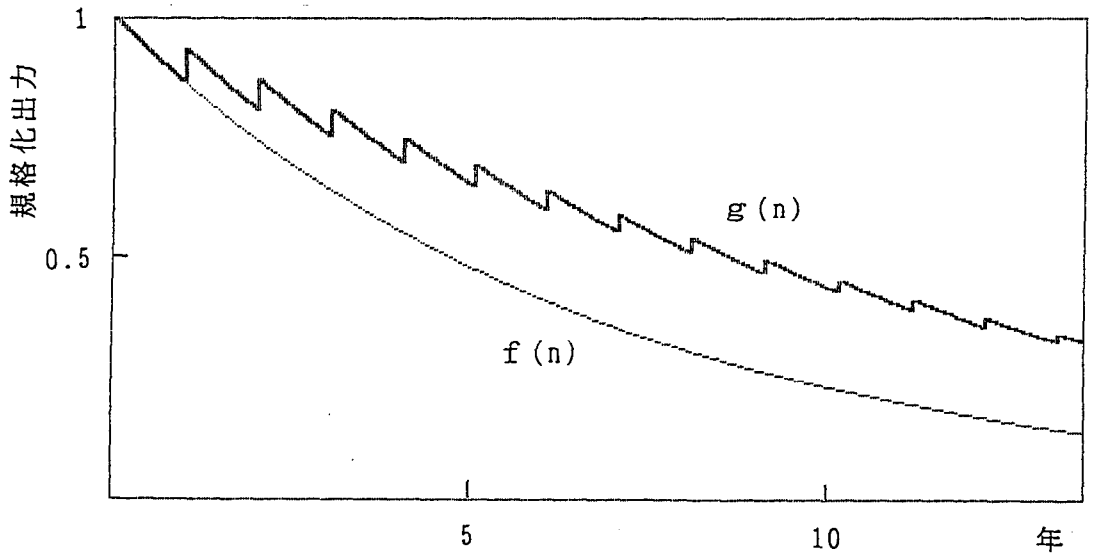


（ｂ）３年４ヶ月（４０ヶ月）

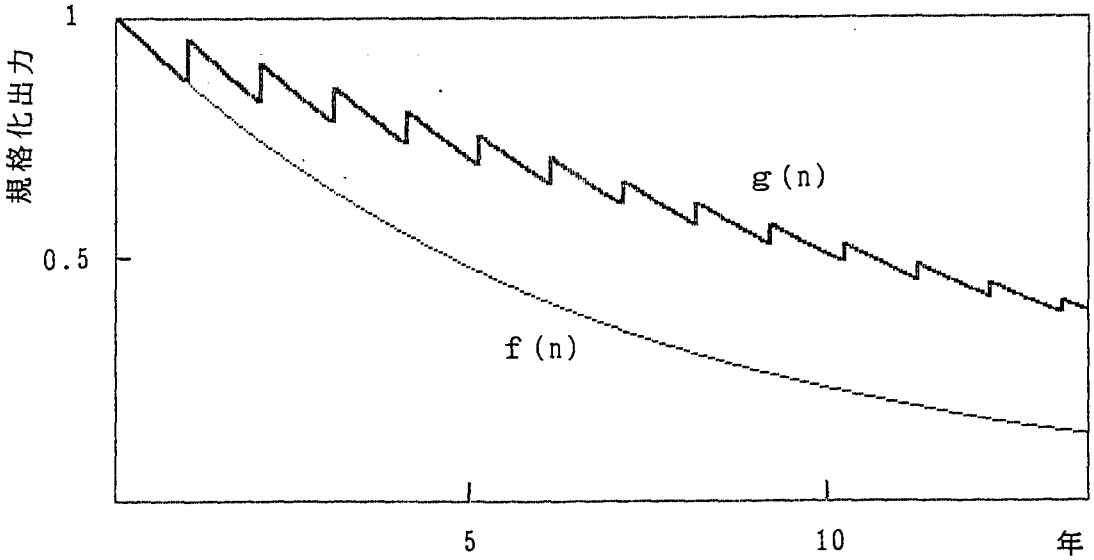
図３－１０　シミュレーションによるアニール処理特性



（ａ）出力の低下が著しい１月（１２ヶ月）



（ｂ）出力が上昇中である５月（１２ヶ月）



（ｃ）出力が低下し始める９月（１２ヶ月）

図３－１１　出力増減時におけるアニール処理特性

３・５　まとめ

光照射を受けて発電出力および変換効率が低下していくアモルファス太陽電池の経年変化特性より、夏期の温度上昇によるアニール処理効果で回復していく特性にに着目して、外部から直接アニール処理できる集光加熱装置を試作した。試作装置のアニール処理温度を１００～１１０℃に保って１２０分ほどアニール処理すれば、試料によりバラツキはあるものの７２％の回復率が得られ、光劣化速度を遅くすることができた。しかし、長期間の光照射によって、太陽電池内部に回復しにくい欠陥部分などが発生して高い回復率を得ることは困難である。

回復率を高くするには、アニール温度と時間の他にアニール周期が大きな要素をもつことから、アニール周期をパラメータにいくつかの仮定をもうけてアニール期間と回復率との関係をシミュレーションにより予測した。

５年間の光照射により、発電出力が５０％近くに低下していたアモルファス太陽電池を集光加熱装置でアニール処理した結果、６７％まで回復した。これを５年周期でアニール処理したシミュレーション結果と比較した場合、６６．９％とほぼ同様な回復率が得られている。また、アニール周期を速めて３年４ヶ月経過後にアニール処理すれば８６．８％まで回復する。さらに、発電出力が著しく低下する１月頃に毎年アニール処理すれば、劣化速度と回復速度とがバランスして光劣化の進行を緩慢にすると同時に１０年後の発電出力を２倍以上に維持できることが分かった。

最後に、集光加熱装置を用いたアニール処理結果が、恒温槽内で行ったアニール処理結果と同等な効果が得られることを明らかにできた。また、シミュレーション結果より、年１回発電出力の低下が著しい１月頃にアニール処理すれば、アモルファス太陽電池を電力用として用いても十分実用化できることを示した。

参考文献

(1) S.L.Staebler and C.R.Wronski:Reversible Conductivity Changes in Dis-change-Produced Amorphous Silicon Appl,phys,Letters 31 No.292 1977

(2) 内田：特集・太陽電池の開発とその応用“アモルファス太陽電池”ＯＨＭ Vol.7 p29-32(3) 1980

(3) A.Modan,et al: Metal-Insulator-Semiconductor Solar Cells Using Amorphous Si:F:H Alloys. Appl.phys-Lett.37 No.12 1980

(4) 林豊：太陽電池開発の展望 電総研彙報 Vol.51 1987 p2-6

(5) 小長井：ｱﾓﾙﾌｧｽ太陽電池の高効率・高信頼化 Vol.60 No.10 p1014-1017 1991

(6) M.Stutzmann,W.B.Jackson,and C.C.Tsai:Light-induced metastable defects in hydrogenated amorphous silicon: A systematic study. Phy,review B Vol.32 p23-47 1985

(7) Stutzmann,M:The origin of light-induced metastabl defect in amorphous silicon. Vol.60 No.10 p1004-1009 1991

(8) 青木、内田、酒井：電力用アモルファス太陽電池の研究 富士時報 Vol.3 p175-180 1985

(9) 津田、二宮、樽井、高濱、大西：アモルファスシリコンの高品質と太陽電池への応用 三洋技術技報 Vol.20 No.3 p50-62 1988

(10) 逸見、安田：太陽電池の経年変化に関する一考察 太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究会 11 1990

(11) 逸見、安田：アモルファス太陽電池の特性劣化 電気学会全大 1535 1991

(12) 逸見：アモルファス太陽電池の特性改善に関する考察（Ｉ） 太陽エネルギー学会、風力エネルギー協会合同研究会 3 1991

(13) 逸見：アモルファス太陽電池の出力特性 エネルギー・資源学会研究会 Vol.1-2 1992

(14) 逸見：アモルファス太陽電池劣化抑制に関する考察 第３回高効率 太陽電池ワークショップ（電気学会半導体電力変換技術委員会） C7 1992

(15) 逸見：太陽電池の長期劣化抑制法 日本太陽エネルギー学会・風力エネルギー協会合同研究会 13 1992

(16) 逸見：アモルファス太陽電池の光劣化と回復効果 電学全大 1993

(17) 逸見：アモルファス太陽電池の長期劣化抑制法に関する考察 日本太陽エネルギー学会論文誌投稿中 Vol.93-3 1993

(18) J.Itsumi:The control method against the long period deterioration of the amorphous solar cell. ISES'93 Budapest 1993

(19) M.Ohnishi : High Efficency Amorphous Silicon Solar Cell Module With High Reliability.Ohnishi Doctor paper 1990

(20) S.Tuda, N.Nakamura, K.Watanabe, M.Nisihkuni, M.Ohnishi, S.Nakano,Y. Kishi, H.Sibuya, and Y.Kuwano : Tech Digest Int.PVSEC-1,Kobe 1984 213

第４章　太陽光・風力発電併用システムとその最適化利用

４・１　序

自然エネルギーは密度が薄く断続的であり、しかもその源は種々の形態をとっていることから、信頼性の高いエネルギー源として利用するには、いくつかの自然エネルギーを組合わせて適用することである。従来は、発電源ごとに出力電圧や周波数が異なることから、制御装置や蓄電地を用いて別々に制御し電力供給を行っていた[(1)-(5)]。そのため気象変化に対する発電源相互間の連系運転が困難で変動に対応できず信頼性や稼働率の低下を招き、さらに、発電源ごとに制御装置や蓄電地を必要とすることからコスト面からも問題とされていた。

本章では、蓄電池電圧を利用して発電源ごとにチョッパを挿入し、チョッパの出力電流最大値を検索して各発電源の最大出力制御を行い、マルチプレクサで同時に多数の発電源を監視する最大出力制御法について論じたものである。ここでは、自然エネルギーに太陽光発電と風力発電併用したシステムを試作して、気象や負荷変動に対する応答特性、相互干渉などの運転特性について検討した[(6)-(10)]。また両者は、次のような特徴を持っている。日射量は夏期に多く冬期に少なく、風力は冬期に多く夏期に少なというように年間を通して供給量が安定している。さらに、日射量は昼間に風速は夜間に多く得られることから、両者併用して用いれば自然エネルギーを効率よく利用した発電システムが構成できる。

ここではまず、気象変動の影響を受けないでシステム特性評価が可能な太陽電池出力特性および風車出力特性を備えたシミュレーターを製作する。次に、各シミュレーターの出力端に挿入したチョッパによって、種々な気象変動に対する併用システム特性が、常に最大出力点付近で運転されていることを明らかにする。

４・２　太陽電池シミュレーター

図４－１に示すＰ－Ｖ特性を持つシミュレーターをアナログ回路で実現するには、回路が複雑化することから気象変動が起こしにくい。ここでは、１チップのＣＰＵを用いて太陽電池のＶ－Ｉ特性をＲＯＭに書込み、定電圧電源と降圧チョッパで構成した主回路出力（図４－３、）を、ＲＯＭの値と一致するようにフイドバック制御をかけ出力を適正値に持っていく方法を取った。実際には、降圧チョッパの通流率Ｄを制御することにより実現している。今、図４－２においてシミュレーターの動作点が主回路出力と負荷線１の交点（ａ）で与えられている時、（ｂ）に示すように、負荷が急変して負荷線２にきた場合を考える。

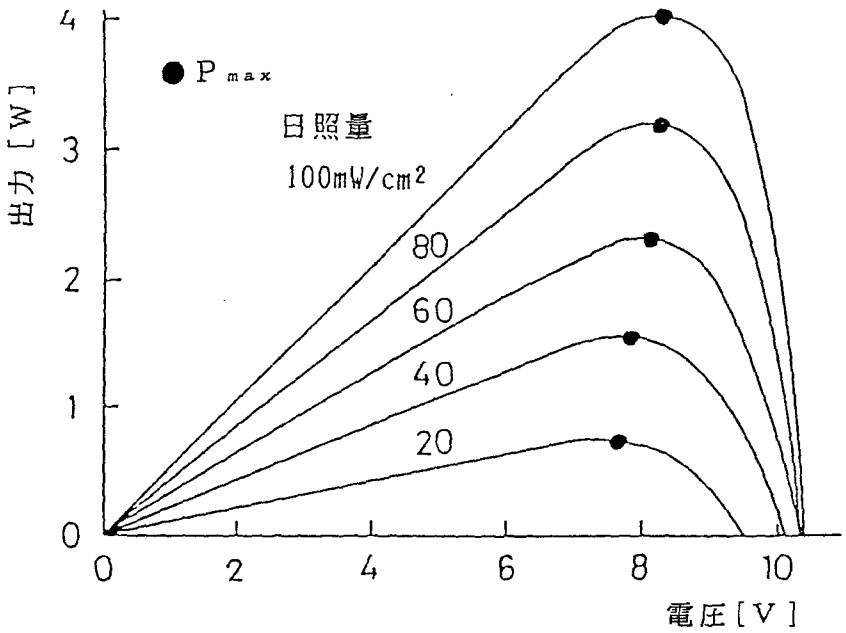


図４－１　太陽電池の電圧－出力特性

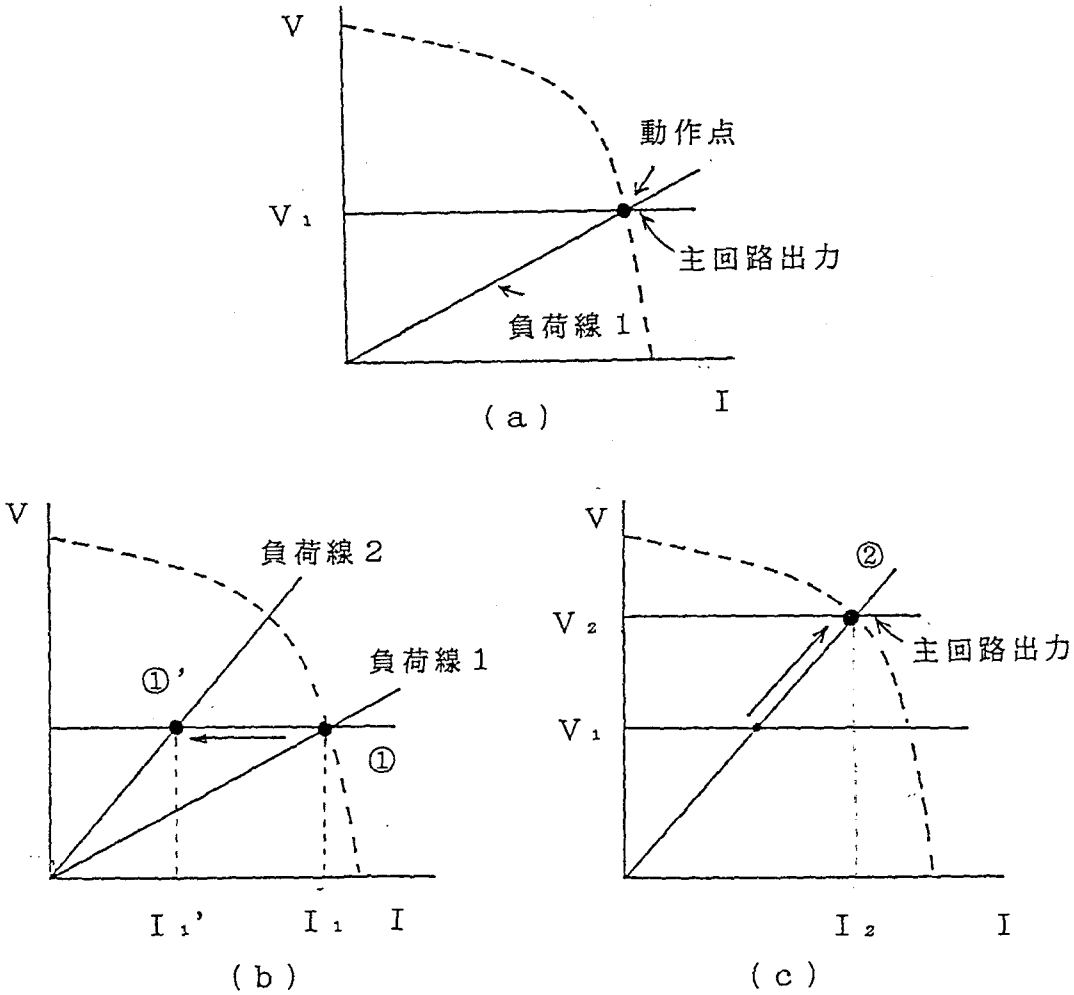


図４－２　制御動作

①にあった動作点はすぐには追従できず①′へ移行することから電流はI_1'に減少する。チョッパの出力電流がＲＯＭに書込まれている電流値I_1より小さいとの指令がだされると、制御回路はＤを大きくする方向に働いて動作点を（ｃ）のＶ－Ｉ特性上の②の位置に移動させてシミュレーター特性を実現している。

図４－３に太陽電池出力のシミュレーター回路構成を示す。チョッパの出力電圧は１０[μs]ごとに、Ａ／Ｄコンバータによってディジタルデータに変換され、ラッチを経由してＲＯＭのアドレスラインに送られる。ＲＯＭにはその電圧に対応した電流データが書込まれており、このデータをＤ／Ａコンバータによってアナログ信号に変換する。変換された電流データと実際のチョッパ出力電流と比較して、両者の差が小さくなるように通流率（$D=T_{ON}/T$）を制御して、主回路の出力をＲＯＭの値と一致させている。

ＲＯＭには８通りのデータが書込まれており、特性切り換えスイッチで瞬時に選択できることから、日射量や温度変化に対応したシミュレートーが可能となる。

４・２・１　ＲＯＭへのＶ－Ｉ特性書込み方法

シミュレータの出力電圧は８ビットのＡ／Ｄコンバータによってディジタルデータに変換されてＲＯＭのアドレスに送られるので、ＲＯＭには特性曲線一本当たり$2^8=256$点の電流データが書込まれる（図４－４）。さらに、特性曲線を８本書込むとすれば２５６×８＝２０４８点の電流データを書込むことになる。これを１点１点ＲＯＭライターによって書込むことは可能であるが、打ち込み時間とミスが多くなることから、２章で述べた太陽電池の等価回路をもとにＲＯＭにデータを書込んだ。太陽電池の出力電流は（４－２）式で与えられるが、このままでは扱いにくいので短絡電流I_{sc}、開放電圧V_{oc}に置き換えて式を整理すると（４－１）式が得られる。

$$\frac{\exp[q(V+R_sI)/nkT]-\exp[qR_sI_{sc}/nkT]}{\exp[qV_{oc}/nkT]-\exp[qR_sI_{sc}/nkT]}-\left\{\left(1+\frac{R_s}{R_{sh}}\right)I_{sc}-\frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right\}$$

$$+\left(1+\frac{R_s}{R_{sh}}\right)(I-I_{sc})+\frac{V}{R_{sh}}=0 \qquad (4-1)$$

この式をもとにデータをＲＯＭへ書込むには、

(1) 開放電圧を２５６等分し小さいほうから順に（４－１）式に代入して電流Ｉを算出する。計算に当たって（４－１）式は代数的に解けないので、ニュートン法により左辺を０とおき近似解を繰り返して代入し、解を真値に近づけていった。

(2) ２５６ポイントの電圧に対する電流を全て計算し終えたら、シリアルインター

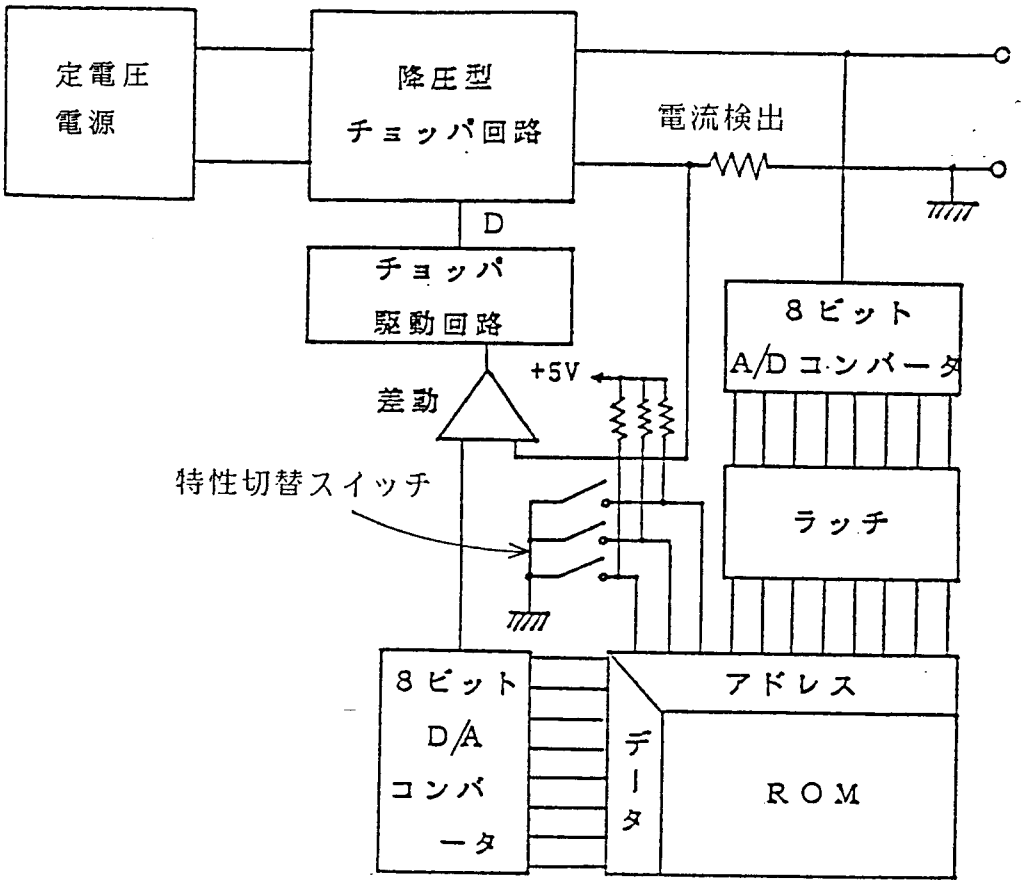


図４－３　太陽電池シミュレーター構成図

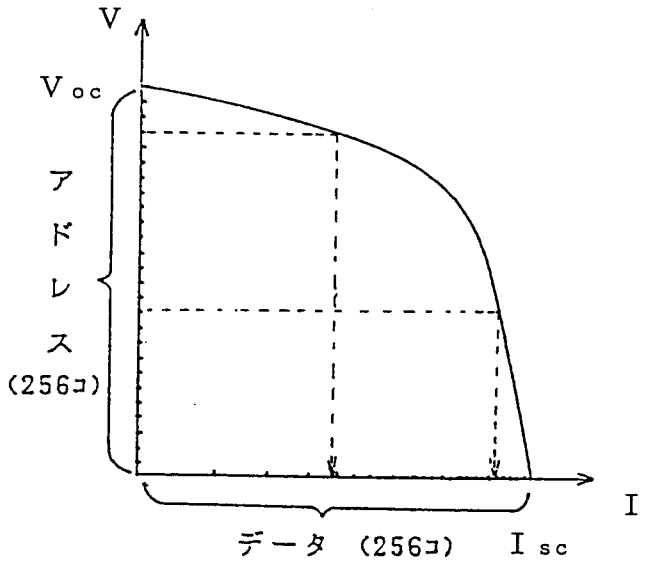


図４－４　ＲＯＭに書込まれるアドレスとデータ

フェイス（RS232C）を通じてＲＯＭライターにデータを転送する。そのさいアドレスは電圧の小さいほうから順に割り振る。

(3) 転送されたデータをＲＯＭに書込む。

４・２・２　シミュレーターの動作特性

図４－５（ａ）は、試作した太陽電池シミュレーターの日射量をパラメータにした電圧－電流特性例である。また、（ｂ）は出力－電圧特性例で図４－１とほぼ同等の特性曲線をシミュレートしている。シミュレーター出力に負荷抵抗（Ｒ＝８０Ω）を接続して、特性をS_4からS_0へステップ状に切り替えた時の応答特性を図４－６に示す。日射量が急変してS_4からS_0の最大出力動作点に落着くまでに約３[ｍｓ]を要している。

さらに、２章で述べたオン・オフ制御に伴う振動特性は、図４－７に示すように８[Hz]では見られないが、２５[Hz]付近から静特性と動特性間のずれが目立ち、５０[Hz]になるとループが現れるようになる。

４・３　風力発電シミュレータ

４・３・１　風車特性

風の持つ運動エネルギーを、数枚の羽根で受けて回転エネルギーに変換する役目が風車である。風車に発電機を直結すれば電気エネルギーとして取り出すことができる。質量ｍ、速度Ｖの物体が持つ運動エネルギーは、$mV^2/2$であるから、面積Ａの領域を風速Ｖで通過する風の持つ運動エネルギーＷは次式で与えられる[11]。

$$W = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2}(A\sigma V)V^2 = \frac{1}{2}A\sigma V^3 \qquad (4-2)$$

ここで、σ：空気の密度［$kg \cdot s^2/m^4$］、Ａ：風車の風の当る面積［m^2］

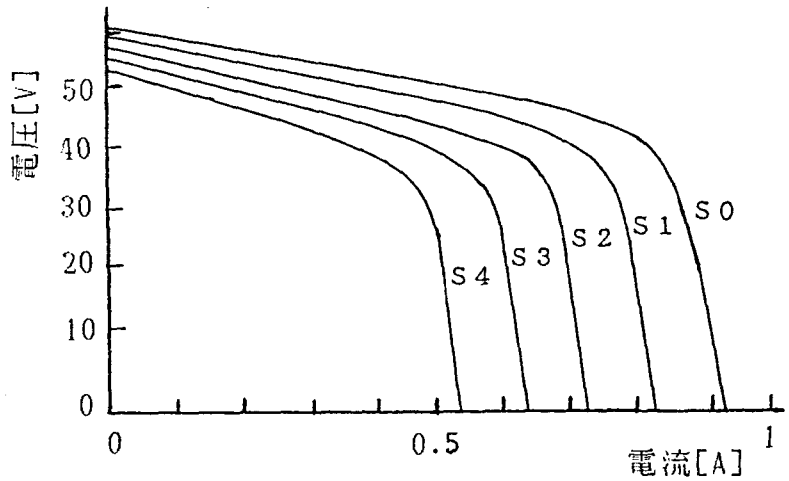
Ｖ：風速［m/s］

ゆえに風車によって得られる運動エネルギーは、風車の面積Ａおよび風速の三乗に比例する。また風車は、出力係数C_Pと周速比（ＴＳＲ）を用いてその性能が評価される。

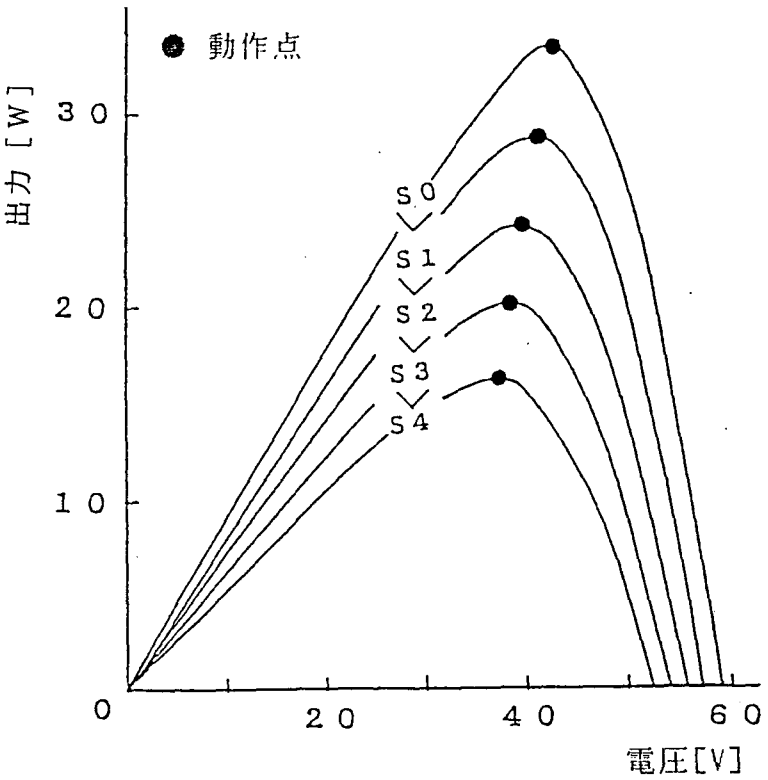
（１）出力係数C_P

自然が持つ風の運動エネルギーから、風車を利用して実際に取り出せるエネルギーの割合を出力係数C_P（Power Coefficient）と呼び、次式で表わされる。

$$C_P = \frac{\text{実際に得られる出力}}{(A\sigma V^3)/2} \qquad (4-3)$$



（a）電圧－電流特性



（b）出力－電圧特性

図４－５ 試作した太陽電池シミュレーター特性

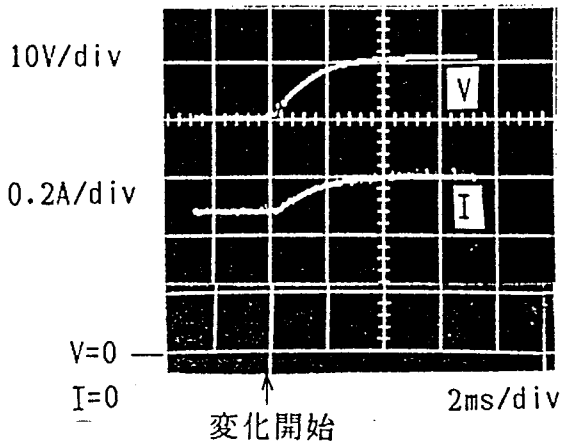
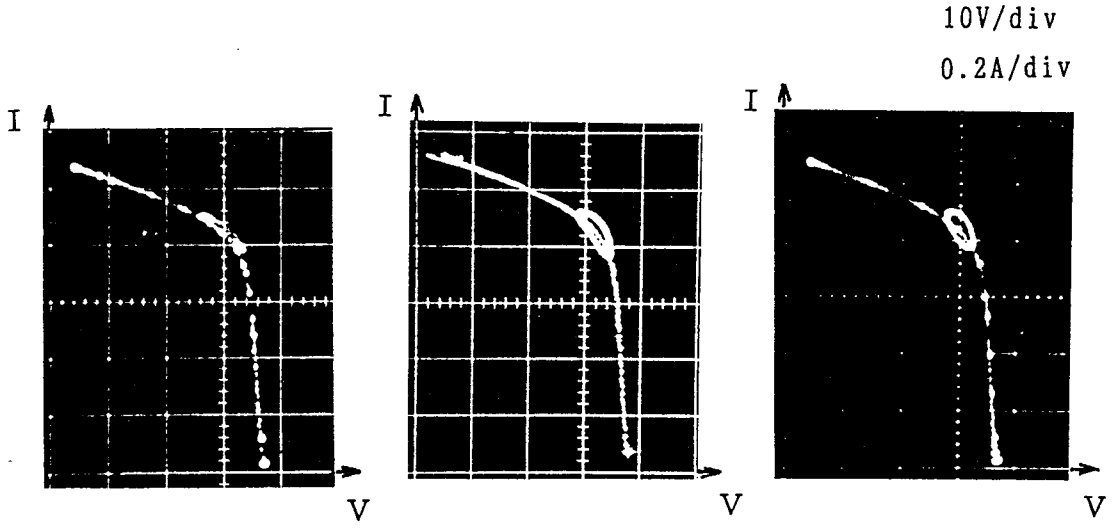


図４－６ 太陽電池シミュレーター応答特性



（ａ）８Ｈｚ　（ｂ）２５Ｈｚ　（ｃ）５０Ｈｚ

図４－７ 太陽電池シミュレーター動特性

出力係数C_Pの最大値は理想的な風車で０．５９３≒０．６となり、実際の風車については高性能プロペラ型で０．４５、抵抗型のサボニウス風車で０．１５程度である。また、風車の性能を表すもう一つの値を周速比（Tip Speed Ratio）と呼ぶ。

（２）周速比（ＴＳＲ）

風車ブレードの翼端の進行速度と風速の比で定義され、周速比または先端速度比と呼ばれ、次のように表される。

$$TSR = (2\pi NR)/V \qquad (4-4)$$

ここで、Ｎ：風車の回転数［rps］　Ｒ：風車の半径［m］

ＴＳＲは無次元である。

４・３・２　風車出力と速度、風速の関係およびシミュレータ動作特性

単位面積を横切る風の持つ運動エネルギーは、風速の三乗に比例し回転数（周速比）がある一定の所で最大効率となる。この条件を満たすには一定励磁の直流発電機の出力を想定し、風速の変化もシミュレートできることが必要である。図４－９（ａ）に風車の回転速度と風車出力特性を示す。このような風車に（回転速度と出力電圧が比例関係にある）効率の高い発電機を接続した場合、その特性は回転速度を出力電圧に、風車出力を発電機出力に置き換えたものと等しくなる。同図（ｂ）従って最大出力と電圧並びに風速との関係は、

（１）最大出力は風速の三乗に比例する。

（２）最大出力における電圧は風速に比例する。

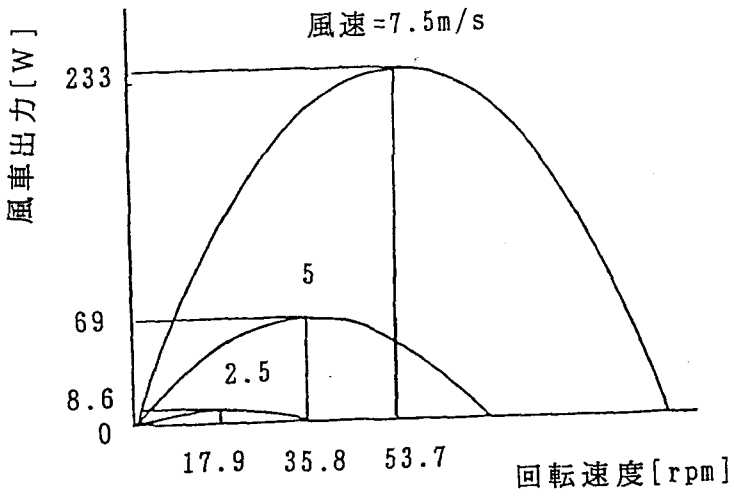
この特性を模擬した等価回路を図４－９示す。この回路の最大出力P_{max}は、Ｅが$E_s/2$の時発生するから、E_sを風速に対応させるならば、最大出力点における電圧は風速に比例することになる。すなわち、ＲをＫ／E_sとなるように制御すれば最大出力P_{max}は、

$$P_{max} = \frac{E_s}{2} \times \frac{E_s - (E_s/2)}{K/E_s} = \frac{E_s^3}{4K} \quad (K：定数) \qquad (4-5)$$

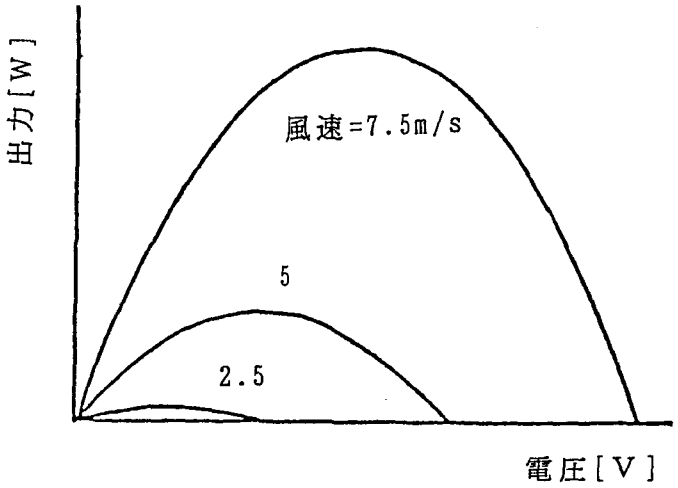
で与えられることから、最大出力は風速の三乗に比例する。

図４－１０は、（４－５）式を満足するよう試作した風力発電シミュレーターの主回路である。定電圧電源と降圧チョッパおよび電流検出器より構成される。

降圧チョッパの制御信号に検出された出力電流Ｉが（４－６）式を満すようフィドバック制御をかけることによってシミュレーター特性を得ている



（a）風車の作動曲線



（b）発電機の出力特性

図４－８ 風車出力と発電機の出力特性

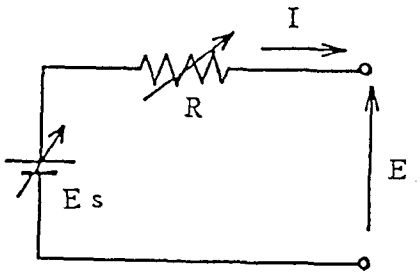


図４－９ 風力発電シミュレーター等価回路

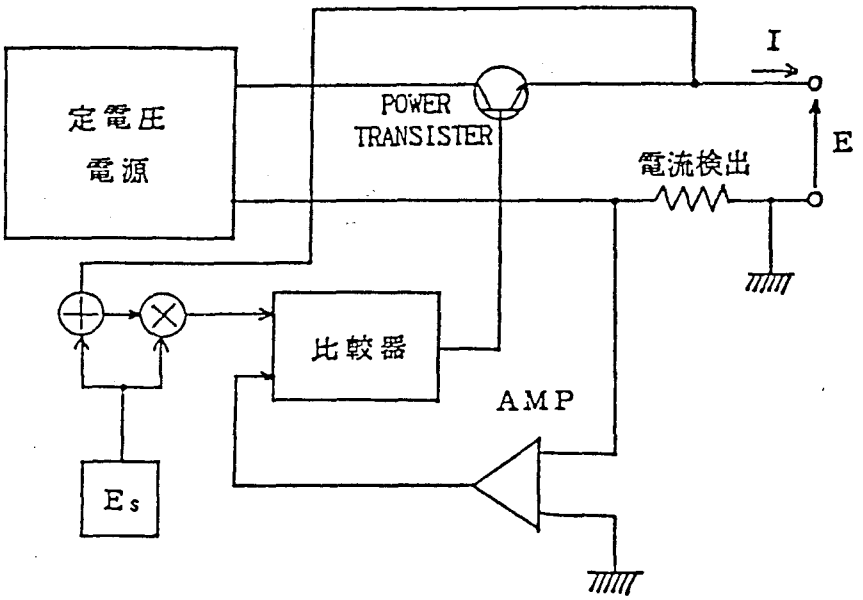


図４－１０　風力発電シミュレーターブロック図

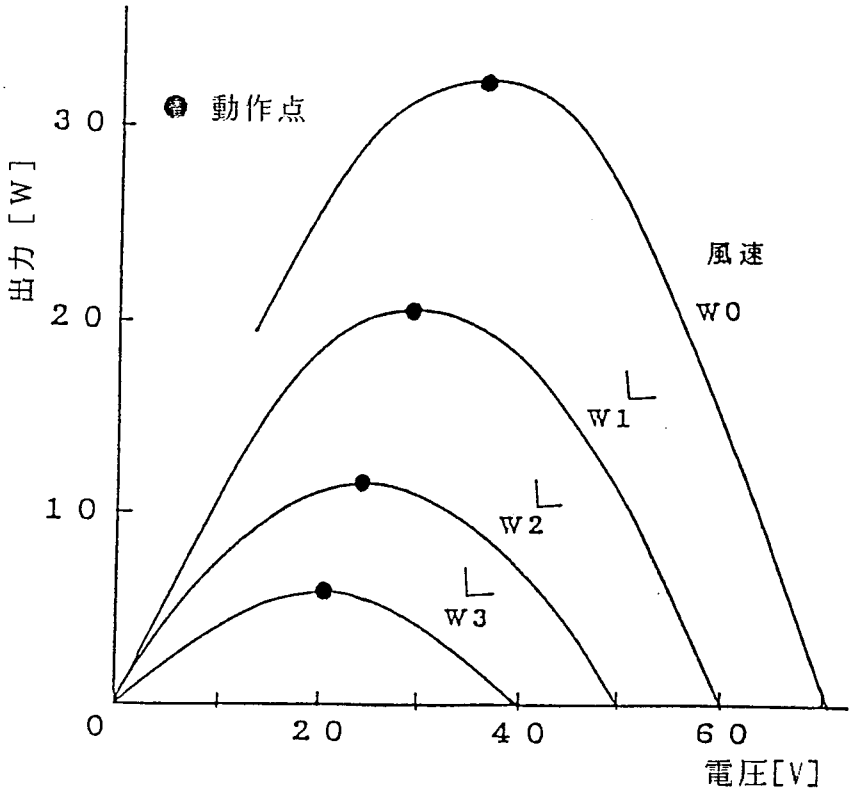


図４－１１　試作した風力発電シミュレーター特性

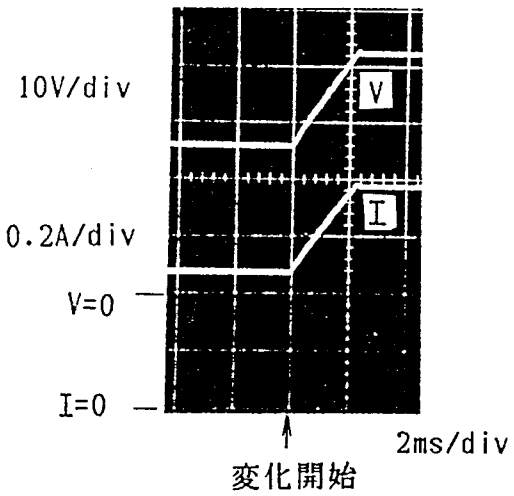


図４－１２　風力発電シミュレータ応答特性

$$I = (E - E_s) / (K / E_s) \qquad (4-6)$$

試作した風力発電シミュレーターの出力特性を図４－１１に示す。得られた電力－電圧特性は、図４－８（ｂ）で示した発電機の出力特性を良くシミュレートしている。シミュレーター出力に負荷抵抗（Ｒ＝５０Ω）を接続し、風速をW_2からW_0の特性へステップ状に切り替えた時の応答特性は約２［ｍｓ］（図４－１２）と、慣性の非常に少ないシミュレーター特性を実現している。

最後に、特性が大きく異なる太陽電池シミュレーターと風力発電シミュレーターの出力に個々にチョッパを挿入し、気象変動および負荷変動を与えた場合の両シミュレーター出力は、共にチョッパによって常に最大出力点附近で運転されていることが確認された。

４・４　併用システムの概要

季節や時間帯によりエネルギー密度や変動性が大きく異なる、太陽光発電および風力発電を併用すれば自然エネルギーを効果的に利用できる。太陽光・風力発電併用システムの制御ブロック図を図４－１３に示す。両発電端に挿入された昇圧チョッパをオン・オフ制御することによって最大出力制御を行ない、発電出力を負荷あるいは蓄電池に供給すれば独立電源システムとして動作する。また、インバータ装置で交流電力に変換すれば交流負荷にも供給できさらに、系統連系装置を用いれば系統連系も可能なシステムとなる。

図４－１４（ａ）は、併用システムの主回路で、アレイおよび昇圧チョッパと蓄電池より構成される。制御回路はＭＯＳＦＥＴのドライブ回路、電流検出器、マルチプレクサおよびコンピュータより成っている。最大出力点の検索法は太陽光発電、風力発電とも同じ制御方法をであることからここでは、（ｂ）に示す太陽光発電を例に述べる。コンデンサC_1は、第２章、２・４節で述べたオン・オフ時に生じる振動抑制用である。

４・５　併用システムの基本特性

４・５・１　昇圧チョッパの設計

図４－１５に示す昇圧チョッパはインダクタンスＬ、スイッチＱ（高電力半導体素子）およびダイオードD_1などで構成される。スイッチＱを高速でオン・オフさせることによって、入力電圧V_1を昇圧させて最大２倍までの出力電圧V_2を得る方式である[12][13]。今、スイッチＱがオンした場合、チョッパ入力電流I_1はインダクタＬに流れ込み電磁エネルギーが蓄積される。Ｑがオフ時に蓄積エネルギー

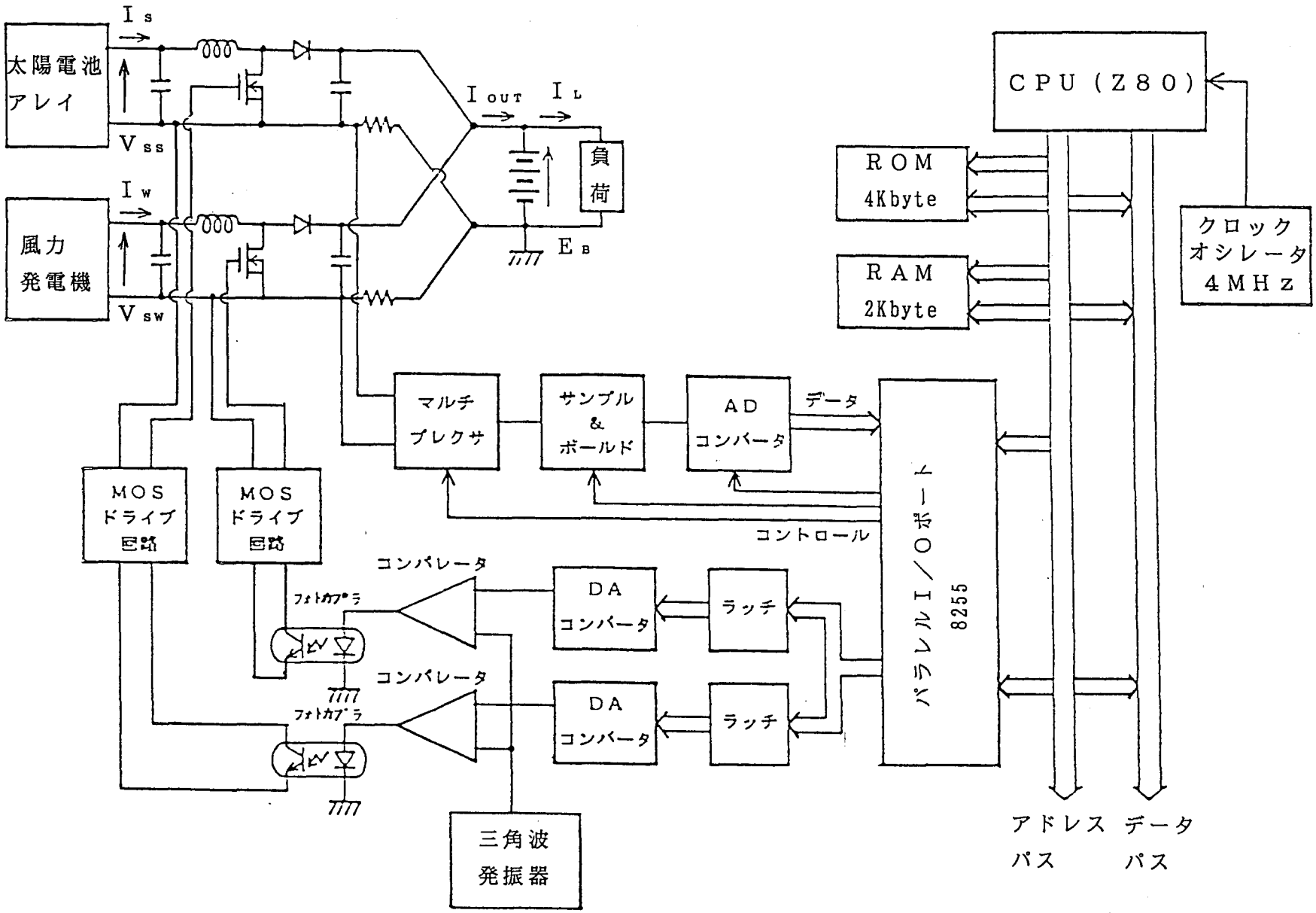
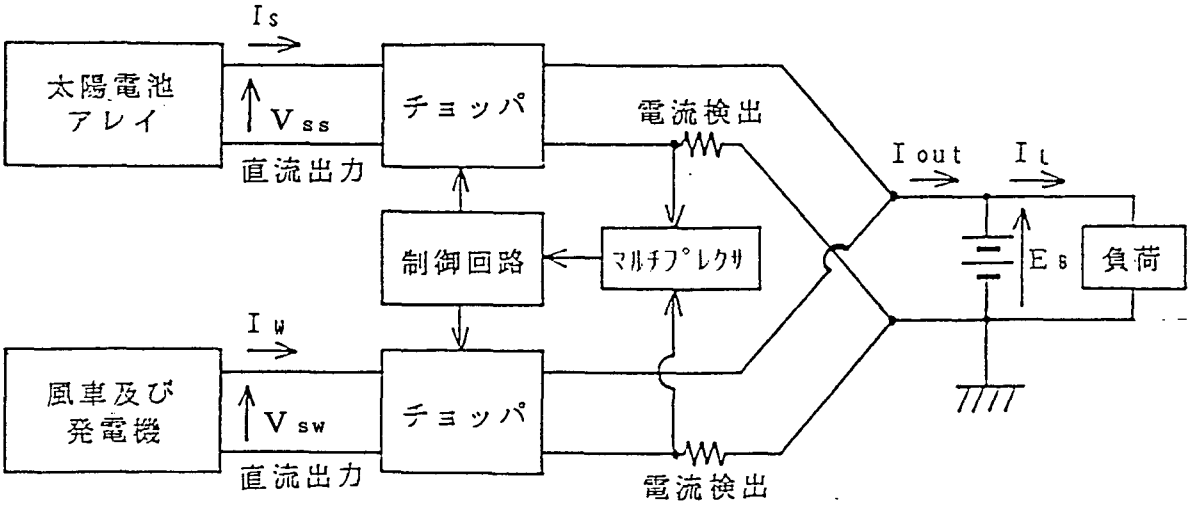
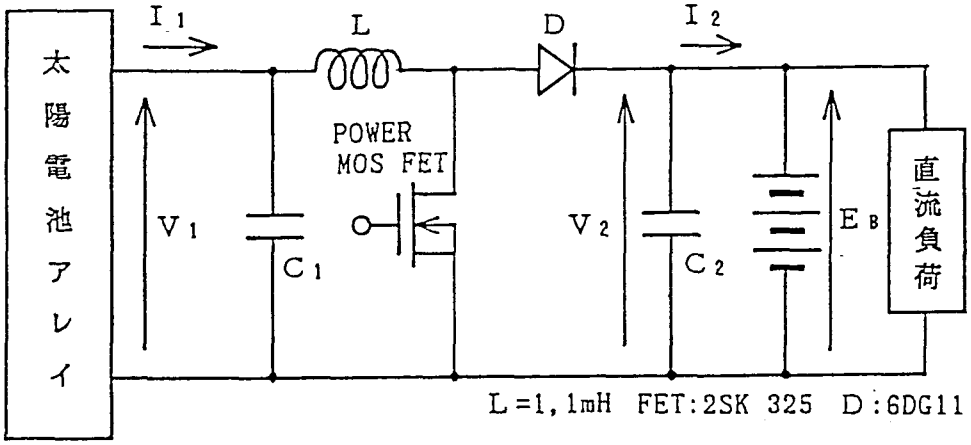


図４－１３　併用システムの制御ブロック図



（a）概念図



（b）太陽光発電の主回路構成

図４－１４ 併用システム

蓄積エネルギーと電源がダイオードD_1を通ってC_2を充電することから、Qのオン時間（T_{ON}）を制御すれば充電エネルギーが変化し、出力電圧V_2が増減することになる。今、Qを理想的なスイッチとし、チョッパ入力電流I_1が、（b）に示すように連続モードをとると仮定した場合、チョッパ出力電圧V_2および電流I_2は次のようになる。

$$V_2 = V_1 (T / T_{off}) = V_1 / (1 - D)$$

$$I_2 = I_1 (1 - D) \qquad (4-7)$$

D(＝T_{on}／T)は通流率と呼ばれ、$0 \leqq D \leqq 1$の範囲にあり$V_1 \leqq V_2$となることから昇圧形チョッパと呼ばれる。また、（b）に示すI_Lの連続モード波形よりI_Lが$I_{Lmin} = 0$の時、$I_1 = I_L = (1/2) I_{Lmax}$ となるからインダクタンスLは次式で与えられる。

$$L = \frac{T_{on} \cdot V_1}{I_{Lmax} - I_{Lmin}} = \frac{T_{on} \cdot V_1}{I_{Lmax}} = \frac{T V_2 (D - D^2)}{2 I_1}$$

$$= \frac{T V_2}{2 I_1} \left(\frac{1}{4} - \left(D - \frac{1}{2} \right)^2 \right) \qquad (4-8)$$

（4－8）式のLは$I_{Lmin} = 0$となる時のインダクタンスであり、電流振幅が大きく実用的でないことから、実際にはこの値を下限値としてさらに大きなLが必要である。また、V_2を一定にしてDのみで制御する場合、（4－8）式におけるLの最大値はDが1／2の時であるから、必要なインダクタンスLは次のようになる。

$$L \geqq T V_2 / 8 I_1 \qquad (4-9)$$

ただし、I_1は使用する範囲の下限値の電流値である。

いま、スイッチング周波数を50［kHz］、V_2＝100［V］、I_1＝3［A］の時に必要なLの値は（4－9）式より、L≒85［μH］となる。また、振動抑制用コンデンサC_1は、入力電圧V_1の許容変動量をΔV_1とすれば、

$$C_1 = \frac{T^2 \cdot D \cdot V_1}{4L \cdot \Delta V_1} \qquad (4-10)$$

で与えられるから、D＝1／2、V_1＝50［V］、ΔV_1＝2［V］とした場合、C_1には15［μF］を挿入すれば振動が抑制される。

4・5・2　最大出力点検索法

蓄電池の端子電圧（E_B）は、図4－16に示すように充放電電流によって大きく変化するが、充放電モードの変化が急激かつ頻繁でないかぎり、本制御回路の動作時定数内において蓄電池端子電圧E_Bは実質的に一定と仮定できる[14][15]。

また、チョッパは理想的なスイッチとし損失は無視できるものとして基本的な考えを述べる。図４－１４（ｂ）において、アレイ出力をP_1（$=V_1I_1$）、チョッパ出力をP_2（$=V_2I_2$）とすると（４－１１）式が得られる。

$$P_1=V_1I_1=V_2I_2=P_2 \qquad (4-11)$$

V_2は蓄電池端子電圧E_Bに等しく$P_1=E_BI_2$となるから、アレイ出力の最大条件はチョッパの出力電流I_2（平均値）が最大の時である。すなわち、チュッパ入力電圧V_1とチョッパ出力電圧V_2（$=E_B$）並びに通流率Ｄとの間には次の関係がある。

$$V_1=(1-D)V_2=(1-D)E_B \qquad (4-12)$$

従って、I_2の極大値を検索するようにＤを変化させることで、アレイ動作点電圧V_2は最大出力点附近に自動調整される。

本システムでは、この制御をワンボードのマイクロコンピュータを用いて、図４－１７に示すフロチャートにより行なっている。

まず、Ｄの初期値を出力し電流の初期値をメモリーに格納する。次に、Ｄを⊿Ｄだけステップ上に変化させて電流を検出する。この電流とメモリー中の電流とを比較して、増加もしくは同値であればＤを前回と同じ方向に変化させ、減少であればＤを逆方向に変化させると同時に、メモリー中の前回の電流値を破棄し新しい電流値をメモリーに格納する。これを⊿ｔ秒毎に繰返すことにより、アレイ出力の最大出力点付近で動作させることができる。また、動作点が一点に収束せず常にI_2の最大値を中心に動くことから、蓄電池の充放電による電圧変動はもとより日照量、温度変化にも対応できる制御となる。さらに、動作点を決定するデータがI_2のみであることから、制御回路の簡素化が計られ検索時間を短くできる。

この方法は１個の蓄電池を共有することにより、複数の自然エネルギーを並列に組合わせて同時に制御できることからハイブリッドシステムへ拡張できる。

ハイブリッドシステムは通常、個々の発電出力に挿入されたチョッパを別々に制御しなければならない。本システムでは、マルチプレクサを使ってタイムシェアリングを行うことにより、一台のマイクロコンピュータで制御可能となった。

現在、２４［ｍｓ］毎に電流検索を行っているが、実際のプログラム実行に要する時間は約４［ｍｓ］ほどであり、本システムでは同じ遅れ時間で、最大６つの自然エネルギーを短時間（２４［ｍｓ］）に制御することができる。

４・５・３　電流検出時間の設定法

電流検出時間⊿ｔは、デューテイサイクルのステップ幅⊿Ｄとともにシステムの

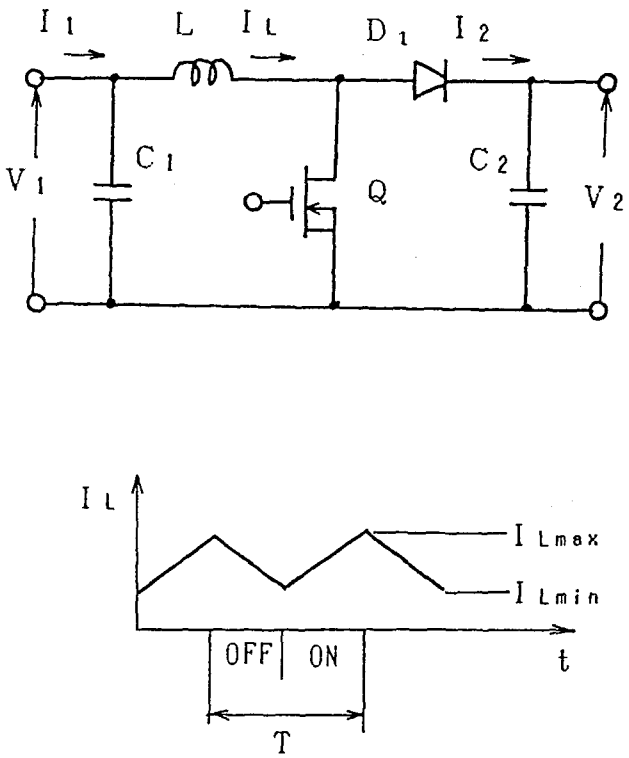


図４－１５　昇圧形チョッパ回路と電流連続モード波形

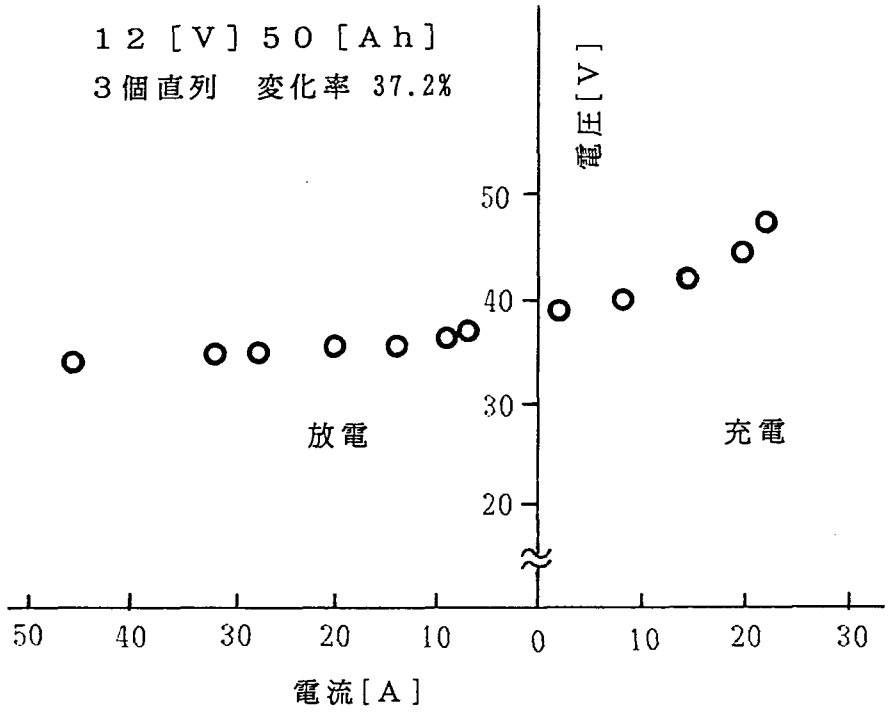


図4－16 蓄電池の充放電特性

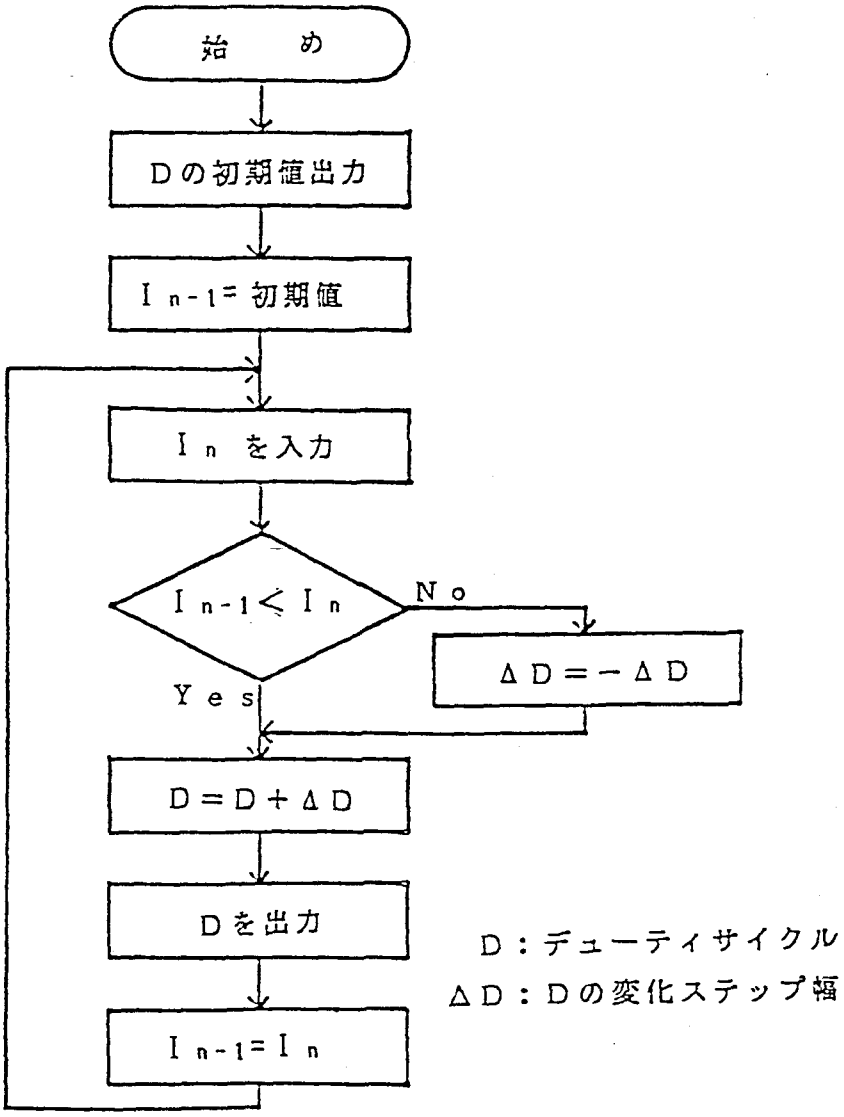
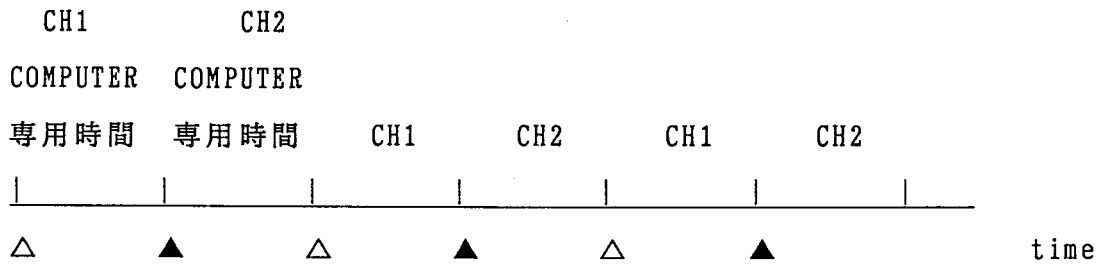
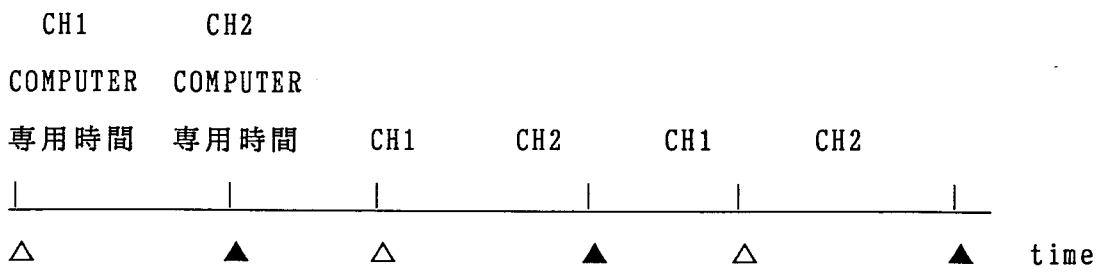


図４－１７　最大電力点検索用フロチャート

応答特性や安定性に大きな影響を与えることから、両システムに対する最適値はカット＆トライで決定しなければならない。⊿Ｄは制御プログラム中の定数を変えることによって比較的容易に調整できる。しかし、⊿ｔはコンピュータをタイムシェリングデ使用しているため、片方のチャンネルのコンピュータ専用時間を可変して電流検出時間を調整すると、もう一方の電流検出時間に影響がでてしまう。
例えば、太陽光より風力の変動時間が速い場合は、図４－１８（ａ）の等間隔な検出時間より、（ｂ）の異なった検出時間の設定が必要となってくる。しかし、ＣＨ１のコンピュータ専用時間を長くすればＣＨ２も同様に長くなる。本システムは、このような相互間の影響を避けるため、まず各チャンネルの専用時間を最短に設定し（これをステージと呼ぶ）、ＣＨ１、ＣＨ２のステージを交互に実行した。各ステージにおいて必ず電流検出を実行するわけでなく、何も行わないダミーステージを挿入して電流検出時間を調整する方法である。図４－１９に電流検出時間の調整方法を示す。



（ａ）等間隔な検出時間

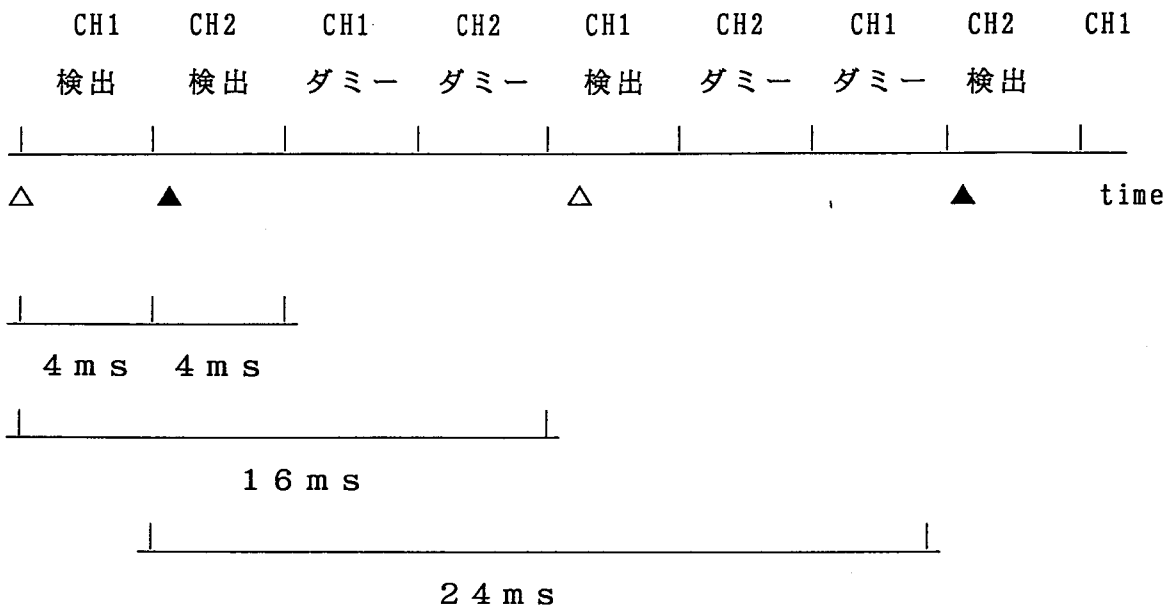


（ｂ）異なった検出時間

CH1：太陽光　　CH2：風力

△：CH1電流検出　▲：CH2電流検出

図４－１８　電流検出時間の設定法



△：CH1電流検出 ▲：CH2電流検出

図４－１９　電流検出時間の調整方法

電流検出ステージと次回の検出ステージ間に、ダミーステージを何回挿入するかを各チャンネル毎に決めておけば、相互間の影響を受けることなく決定できる。
図４－１９の例では、ＣＨ１は８ｍｓ×２＝１６ｍｓ、ＣＨ２は８ｍｓ×３＝２４ｍｓ毎に電流検出が可能となる。

４・５・４　併用システムの動作特性

自然現象の影響を探るために、前節で述べたシミュレーターに気象変動を与え、それに対するシステムの応答性や相互干渉、さらに負荷変動に対するシステムの安定性などについて検討した。
図４－５および図４－１１に示す各シミュレーター特性がS_4、W_3で運転中、日照量をS_4からS_0にステップ状に上昇させた時の太陽電池シミュレーターの出力電圧V_s、電流I_sの応答特性を図４－２０（ａ）に示す。S_4からS_0の最大出力点P_{max}へ移行するのに約０．２秒で応答している。（ｂ）は、各シミュレーター特性をS_4、W_1で運転中、風速をW_1からW_3にステップ状に減少させた時の風力発電シミュレータの出力電圧V_w、電流I_wの応答特性である。W_1からW_3のP_{max}点へ移行するのに約０．２秒で応答している。

次に、両特性が同時に変化した場合の相互干渉について見る。今、各シミュレーター特性がS_3、W_0で運転中、風速のみをW_2の特性点までステップ状に上昇させた時の出力電圧波形例（V_s:太陽電池、V_w:風力発電）を図４－２１（ａ）に示す。風力発電シミュレーターは、風速変化に対応して０．２秒でW_2のP_{max}点に移行する際、太陽電池シミュレータの動作点には全く影響を与えていない。また（ｂ）は、特性をS_0、W_2で運転中、S_4、W_0の特性へ同時に切り換えた時の電圧波形例である。両特性は相互干渉を受けることもなく、スムーズにP_{max}点へ移行している。
図４－２２は、両シミュレータ特性がS_4、W_3で運転中に０．６秒間隔で、両特性をS_0、W_1にステップ状に変化させた時のチョッパ出力電圧E_B、電流I_{out}の応答特性例である。図中のⅠ、Ⅱ、Ⅲ期間の入、出力比を表４－１に示すように、各期間におけるチョッパ変換効率は９０％近く、常に最大出力点附近で運転されていることがわかった。

表４－１　チョッパの入力と出力の関係

	入力電力［W］	出力電力［W］	効率［％］
Ⅰ	２３	２０．９	９０．９
Ⅱ	３９	３５．１	９０．０
Ⅲ	５３	４７．３	８９．３

これまでの変動特性は全てステップ状に与えてきたが、自然現象は多種多様に変化することから、正弦波状の気象変動を与えた場合のシステム応答性について調査した。風速変化を正弦波状にするために、風力発電シミュレーター特性のW_0～W_2間を１０秒間隔で交互に変動させて出力電圧V_wを観測した。
図４－２３に示す出力電圧波形例より、振動周期が１０秒の風速変化に対して出力電圧は、常に最大出力点P_{max}を追従しているのがみられるが、読み取りのタイミングやその他の影響が加わって１０秒以内での追従はできなかった。
最後に、負荷が急変した場合の応答性を見るために、両シミュレータ特性をS_3、W_3で運転中、負荷電流I_Lを無負荷から５［Ａ］に切り替えて各部の波形を観測した。図４－２４より、負荷が急変したことによって蓄電池電圧が変動し、両シミュ

レーターは最大出力動作点（P_{max}）から一時的に外れるが約 ０．３秒後にP_{max}点に復帰している。このように負荷の急変に対しても、常に安定した動作特性を得ることができた。

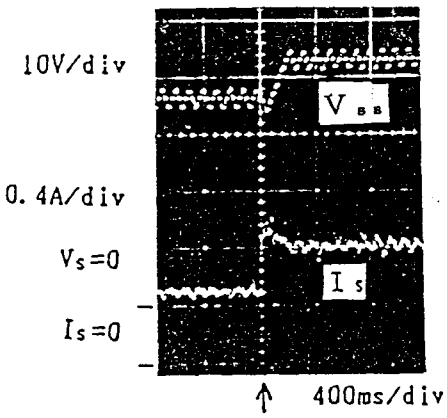
４・５・５　実用化へのアプローチ

試作システムの運転特性はほぼ満足すべき性能であったが、システムを実用化していくに当って、改良していかなければならない点を列記すると、

（１）夜間や雨天あるいは弱風や強風時などで日射量や風力が得られない場合、常に安定した電力を負荷に供給できる蓄電池容量と充放電に適した制御回路を付加しなければならない。

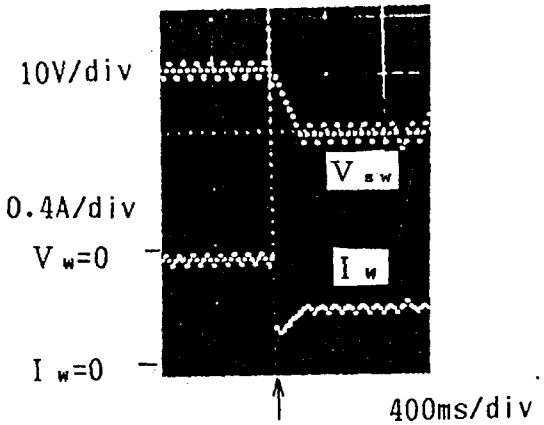
（２）気象変化に対する応答速度は、電流の検出間隔⊿ｔとデューテイサイクルのステップ幅⊿Ｄとによって決定される。⊿ｔを小さくまた、⊿Ｄを大きくすることで応答速度は速くなるが、⊿ｔを小さくしすぎると入力側が追従できず、また⊿Ｄが大きくなりすぎると定常運転状態における動作電圧のスイング幅が大きくなる。シミュレーターを使用した場合、⊿ｔは２４［ｍｓ］、⊿Ｄを１．５６［％］とすればスイング幅も３［Ｖ］程度に収まる。
しかし、実際に併用システムを設置して発電する際には⊿ｔ、⊿Ｄの値は再度調整する必要がある。

（３）本併用システムは独立電源用として開発したものであるが、４章で述べるＰＷＭインバータを用いれば系統連系も可能なシステムとなる。



日射量変化

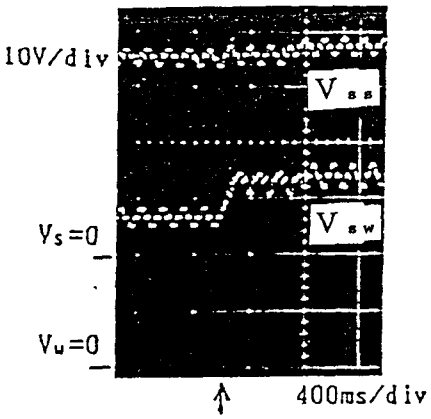
（ａ）日射量変化時の電圧Ｖss
電流Ｉs波形



風速変化

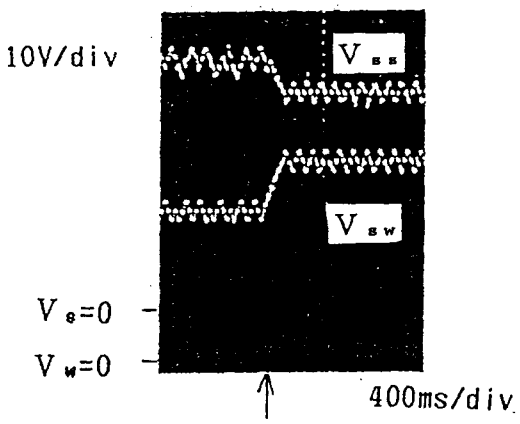
（ｂ）風速変化時の電圧Ｖsw
電流Ｉw波形

図４－２０ シミュレーター応答特性



風速変化

（ａ）風速変化時の電圧波形



変化開始点

（ｂ）日射量および風速を同時に
変化させた時の電圧波形

図４－２１ 日射量、風速変化時の応答特性

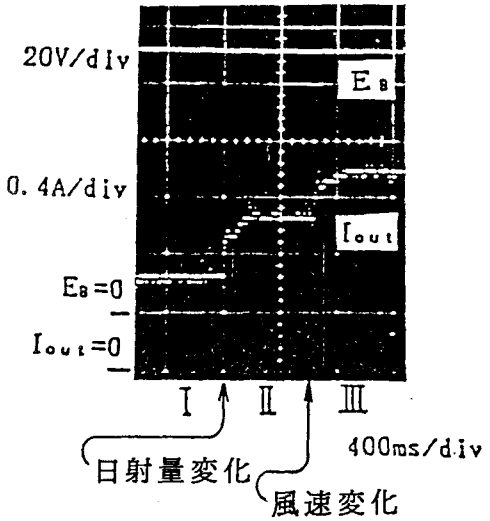


図４－２２ 日射量および風速を０．６秒間隔で変化させた時の出力特性

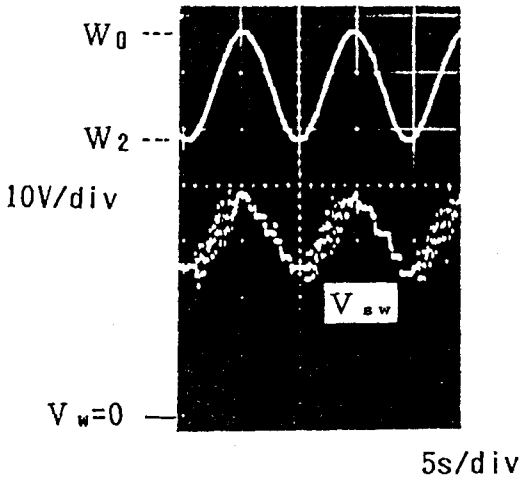


図４－２３ 風速が正弦波状に変化した時の出力特性

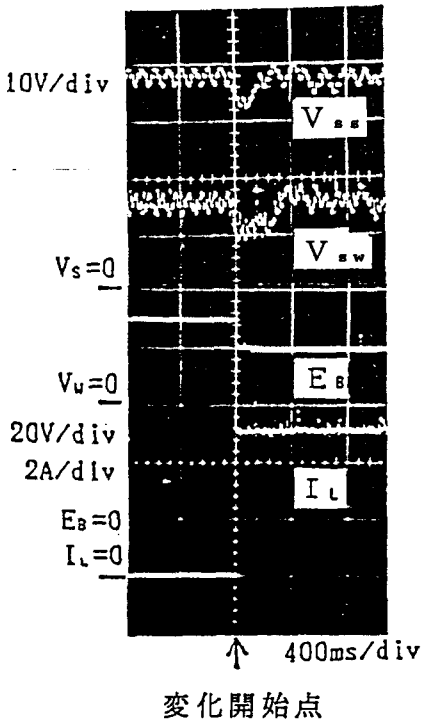


図４－２４ 負荷変動特性

４・６　併用システムの利点

横浜と銚子における年間平均日射量および風速を図４－２５に示す[16]。日射量は３月頃から９月にかけて多く、風速は日射量の少ない１０月頃より３月にかけて多くなる変動パターンを持っている。ここではこのデータを基に、自然エネルギーを別々にあるいは併用して利用した場合の利点について検討する。検討するに当って、個人住宅における１ヵ月間の平均消費電力量を２５０［ｋＷｈ］（１日当りに換算して８．３ｋＷｈ）、また太陽光発電出力を２［ｋＷ］、風力発電出力２［ｋＷ］で合計４［ｋＷ］を設置した場合について試算する。

（１）太陽光発電システム

年間日照量：１９００時間（横浜）　　１日の平均日照時間：３．８４時間
設置面積：１６ｍ^2（４．８５坪）　　太陽電池の変換効率：１０％（単結晶）
太陽電池：８００円／Ｗｐ　　太陽光エネルギー：１ｋＷ／ｍ^2
インバータ（絶縁トランス込み）：４０万円／ＫＶＡ
必要モジュール枚数：７０Ｗｐを３０枚で約１７０万円
系統連系保護装置（過電圧・過電流保護継電器込み）：　５０万円
ＢＯＳコスト（架台、配線、据え付け工事など含む）：１００万円
とすれば、太陽光発電システム２［ｋＷｐ］の総建設費用は４００万円となる。
２ｋＷｐのモジュールにより得られる１日当りの発電出力は、
１６×１×０．１×３．８４＝６．１４４［ｋＷｈ／日］
１ヵ月間に１８４．３［ｋＷｈ／月］の発電出力が得られ、個人住宅における太陽光発電システムの電力供給率は７３．７％（=184.3/250）、また年間システム稼働率は２１．７８％とになる。

（２）風力発電システム

年間風速時間：３５００時間　１日の平均風速　：５．５［ｍ／ｓ］
１日の平均風速時間：５時間　風車（直径５ｍ）：２５０万円（交流発電機込み）
蓄電池（電圧調整用２４Ｖ、１０００Ａｈ）６台：１３０万円
ＢＯＳコスト（過電圧防止、速度調整・周波数変換装置、整流回路を含む）
約２００万円とすれば、風力発電システムのトータルコストは５８０万円となる。
風車より得られる発電出力Ｐ。（$=\rho v^3 \pi r^2 \eta/2$）は、風車および発電機などを含めた総合効率をη＝４０％、空気密度ρ＝１．２２５［kg/m^2］とすれば、
（５．５^3×π×２．５^2×０．４×１．２２５）／２＝８００［Ｗｈ／ｍ^2］

一日の風速時間を５時間とすれば１日当り、８００×５＝４［ｋＷｈ／日］、月に１２０［ｋＷｈ／月］の発電出力が得られ、電力供給率は４８％（=120/250）、また年間稼働率は４０％になる。

（３）併用システム

併用システムでは、発電源個々に挿入されたチョッパがそれぞれ最大出力制御を行なうので、インバータは系統に対する監視のみを行えばよい。また、風力のＢＯＳコストのうち電圧調整機および周波数変換装置は不用となる。また、５章で述べる系統連系システムの場合は蓄電池も不用となる。しかし、自然エネルギーの数が増す毎にチョッパが必要となる。

チョッパ：１０万円／ｋＶＡ　　コンピュータ（PC-98）他：３０万円

インバータ：２０万円／ｋＶＡ　　太陽電池：１７０万円

ＢＯＳコスト（過電圧防止、整流回路など）：１０万円

風車（直径５ｍ）コスト：２５０万円（交流発電機込み）

蓄電池（電圧調整用２４Ｖ、１０００Ａｈ）６台：１３０万円

併用システムコストは７１０万円となる。

個人住宅に併用システムを取入れて発電した場合の電力供給率は、１２１．７％と約２０％強の余剰電力が生じる。１９９２年４月より、配電線を通じて電力会社へ逆潮流する法律が認可されたことから、併用システムにおける売電可能電力量（余剰電力量＋昼間の発電電力量の５０％強[47]）は約１８０ｋＷｈ。ｋＷｈ当り２５円として試算すると月平均４５００円電力料金が安くなる。

また、個々のシステムコストに比べ、併用システムのトータルコストは約２７．６％安くなる。さらに、太陽光の発電量は年間２２１２［ｋＷｈ］、風力の発電量は年間１４４０［ｋＷｈ］、両者の総電力量は３６５２［ｋＷｈ］と標準的個人住宅の年間消費電力量３０００［ｋＷｈ］をしのぐ供給量となる。

併用システムは、日本のように海岸線の多い所では夏期に強く冬期に弱い太陽光、冬期に強く夏期に弱い風力が季節的に合い補う形で存在するなど、未利用な自然エネルギー利用できることから、システムの年間稼働率も６割以上に達し（表４－２）電力貯蔵設備の縮小化が期待できる。

４・７　まとめ

ここでは、自然エネルギーに太陽光発電と風力発電を併用し蓄電池電圧を利用して、それぞれの出力端に挿入したチョッパの出力電流最大値のみを検索する方法に

表４－２　個々のシステムと併用システムの比較

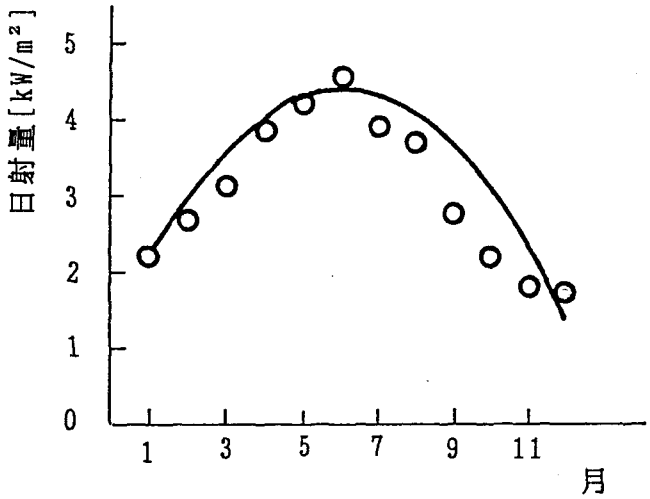
	太陽光発電	風力発電	併用発電
発電規模　［ｋＷ］	2	2	4
コスト　［万円］	400	580	710(-27.6%)
１日の発電出力　［ｋＷｈ／日］	6.14	4	10.14
１ヵ月の発電出力［ｋＷｈ／月］	184.3	120	304.3
年間発電出力　［ｋＷｈ／年］	2211.8	1440	3651.8
年間稼働率　［％］	21.78	40	61.6
設備利用率　［％］	12.6	8.2	10.4
電力供給率　［％］	73.7	48	121.7(+21.7%)
償還年数　［年］	54	63.6	43

年間稼働率＝運転可能時間／年間総時間［％］

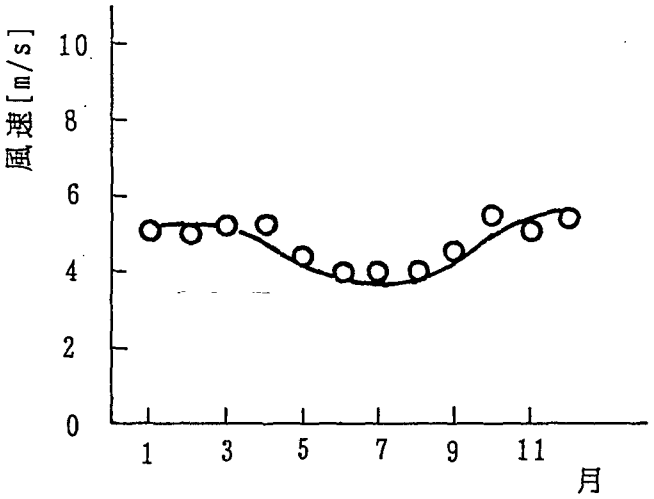
設備利用率＝年間総発電量／定格出力×年間総時間［％］

電力供給率＝１ヵ月の発電電力量／個人住宅の１ヵ月平均消費電力量［％］

償還年数＝総建設費／年間発電料金［年］
但し、石油、ＬＮＧなどのエネルギーコストが今後も変化しないものとして、現行の電力料金（２５円／ｋＷｈ）で試算した。



（ａ）横浜における月平均日射量



（ｂ）銚子（千葉）における月平均風速

図４－２５　月平均の日射量および風速

より、複数個の自然エネルギー発電を同時に制御可能な最大出力制御方法を提案し、試作装置による実証試験からその有用性について述べてきた。

それに先立ってまず、天候に左右されずに実験可能な太陽電池出力特性および風車出力特性を備えたシミュレーターを試作し良好な特性を得た。得られた両シミュレーターの出力端に挿入したチョッパの出力電流最大値を検索しながら日射量および風速一定下で負荷ステップ状に変動させた場合、両出力特性は変動に追従して最大出力点附近において動作されていることを確認した。また、日射量や風速が急変した場合、変動した特性の最大出力点に到達するまでに要した応答時間０．２秒。さらに、負荷が急変した際の応答時間は、蓄電池電圧が変動して両特性は最大出力点から一時的に外れるが０．３秒でもとの動作点に復帰した。

この制御方法は、マイクロコンピュータやＡ／Ｄコンバータなどの高価な部品を追加することなく、ＣＰＵとチョッパだけで最大６つの自然エネルギーを並列運転できることから、自然エネルギーの数が増す程システムコストは低下する。
例えば、太陽光発電システム２ｋＷp、風力発電システム２ｋＷを設置して発電した場合、電圧調整器や周波数変換装置が不用となり、また系統と連系すればインバータ制御が簡略化されるなど、個々のシステムコストに比べて約２７．６％低減できる。さらに、標準的な個人住宅の年間消費電力量を約３０００［ｋＷｈ］とした場合、併用システムの発電電力量は３５９４［ｋＷｈ］と約２１％の余剰電力が生じる。余剰電力は系統を通じて電力会社に売電することが可能となった（９２年４月より）ことから、月平均４５００円近く電力料金を安できる計算になる。しかも、自然エネルギーをまんべんなく利用できることから、時間稼働率も６０％以上に達し、電力貯蔵設備の縮小化が期待できる。

従って、太陽光発電と風力発電のハイブリッドだけでなく太陽光と熱、工場における廃熱発電と太陽光などを併用すれば都市部の補助電源として、風力と太陽光さらにディゼル発電を併用して用いれば山間部や離島などの電源となる。また、太陽光と温泉の地熱とを組合せれば冷暖房、給湯が行える総合レジャーランド地域に最適なシステムとなる。

以上述べてきたように、併用システムは独立電源として必要な蓄エネルギー容量を最小にできる可能性がありまた、系統連系システムとして発電所へのリアクションを最小にできるシステムとなるなど、自然エネルギーをいくつか併用して発電する利用方法は今後、大いに期待されるものと思われる。

参考文献

(1) 熊野、他：太陽光とディーゼル発電を併用した離島用電力供給システム 半導体電力変換研究会 SPC-85-86 1985 p101-111

(2) 水崎：光・熱ハイブリッドパネル 太陽光発電シンポジウム（日本能率協会）Session 4 1989 p25-32

(3) 野村、河本、榊原：太陽光・風力ハイブリッド発電シミュレーションにおけるサンプリング間隔の影響 電気学会全大 1500 1989

(4) Manfred Fender,Hans Detrich Bettermann：Leistungselektronik Fur die Wasserstofferzeugung mit einem 20-kW-Windrad ETZArchiv Bd Vol.11 1989 p113-116

(5) 原田：山岳地域における太陽光・風力ハイブリッドシステム 光発電 Vol.7 1991 p36-37

(6) 逸見、高橋、古川、山形、池田：太陽光・風力発電併用システムに関する考察 電気学会全大 1187 1985

(7) 古川、逸見、山形、池田：太陽光・風力発電併用システムに関する研究 電気学会全大 1174 1986

(8) 逸見、岩堀、山形、池田：自然環境エネルギー発電システムに関する研究 電学論 Vol.107-B No.8 1987

(9) 池田、逸見、平敷：太陽光発電システム用電力変換装置の研究 電気学会全大 491 1982

(10) 逸見、岩堀、高橋、池田：太陽光発電システム開発に関する諸考察 半導体変換研究会 SPC-82-48 1982

(11) 牛山、三野：小型風力車ハンドブック パワー社 1981

(12) 星野、木村、塩谷：チョッパを用いた太陽電池から蓄電池への充電特性について 電気学会全大 513 1987

(13) 大西、島村：チョッパ併用電流型インバータによる小型太陽光発電システム 電気学会産業応用部門大会 49 1988

(14) 市東、今仁、江口：太陽光発電システムの太陽電池および蓄電池容量の最適化電気学会全大 1183 1985

(15) 松本、野本、辻岡、和田：独立型太陽光発電システムの蓄電池容量決定に関する考察 電気学会全大 1209 1986

(16) 本間、牛山、津田：風力エネルギー読本 オーム社 1979

第５章　小規模分散型系統連系用周辺システムとその最適化利用

５・１　序

太陽電池の出力は、気象条件に大きく左右されることから、太陽光発電システム単独では負荷への電力供給が不安定となる。このため、太陽電池出力を適当な方法で制御してやる必要がある。個人住宅用系統連系システムの研究は、六甲アイランドをはじめとして既に実用化試験の段階に入っており、安定した電力を得るためにこれまでに行われてきたこの種の制御方法には、

(1) 基準太陽電池を用いて最大出力点を計測し、太陽電池の最大出力動作点を制御する[1][2]。

(2) 太陽電池出力特性上の動作点を計測し、コンピュータによりメモリ上のデータと比較しながら最大出力動作点を追跡し最適な方向へ制御する[3][4]。

(3) 太陽電池の最大出力点電圧特性が日射量によってあまり変化しないことから、蓄電池電圧により太陽電池電圧を安定化して出力動作点を制御する[5][6]。

(4) 太陽電池出力の電圧、電流を測定して、常に最大出力動作点を追跡するようにインバータを制御する[7]-[9]。

などの方法がある。これらの方法にも一長一短があり、(1)では基準太陽電池とアレイ特性が必ずしも一致せず太陽電池のバラツキによる影響。(2)では制御回路が複雑化することで、コスト、応答性の悪さ。(3)では蓄電池の充放電による変動でアレイの有効利用が難しく、またメンテナンスが必要となる。(4)の方法が簡単に実現可能ならば、家庭用システムに最適であるがアレイ出力を有効に取り出すにあたって、日射量や素子温度に対応した制御を行う場合制御回路が複雑化する。

本章では、これらの点を解決する手法として、太陽電池の出力電圧が日射量の増加に伴ってわずかに増加傾向を示す点に着目して、太陽電池の増加電圧分をインバータ制御にとりいれた新しい制御方法を提案し[10]、日射量や系統電圧変動に対して、試作装置が安定に動作し、損失および高調波の少ない電力を負荷に供給できることについて論じている。

５・２　太陽光発電用インバータ

我が国のように、系統網の発達した環境下における太陽光発電システムの利用形態は付録表１に示すように、配電系統との連系システムが望ましく将来のエネルギー需要の緩和に最も効果的と考えられる。系統連系システムに用いられる太陽光発電用インバータは、発電出力は自然現象に大きく左右されると共に系統電圧や負荷

変動に対しても大きく変動することから、常に安定した発電出力を負荷あるいは系統へ供給するために多くの条件が要求される[11][12]。さらに、直流電力を交流電力に変換す際に発生する、低次高調波は電動機や変圧器などの運転に支障を与え、高次高調波は通信機器などへの誘導障害の原因ともなることから、高調波の発生を２％以下に抑えなければならないなど、下記に示すように多くの条件が要求される。

(1) 太陽電池から効率良く電力を取り出すこと。
太陽電池は変換効率が低いことから、発電出力を有効に抽出できる制御方式の開発。

(2) 高調波の発生が少ないこと。
インバータ出力に高調波が含まれていると、近くの利用者に供給する配電電圧に歪を生じることから単独運転では５％以下、系統連系用では２％のものが要求される。

(3) インバータ変換効率が高く、回路の簡素化と小形が図られること。
太陽電池の変換効率は日進月歩で向上していることから、インバータについても同様に低損失なスイッチング素子の採用、インバータ回路方式（高周波化）の選定、低損失リアクトル、フイルターなどの開発が必要である。

(4) 低価格でメインテナンスを必要としないこと。
基本的には静止機器であるためメインテナンスフリーであるが、発電装置として従来は、電力事業者のもとで十分管理されていたものが、太陽光発電では一般人が取扱うことを考えて安全性には十分注意を払うことが必要である。

また、運転特性に要求されるものとして、

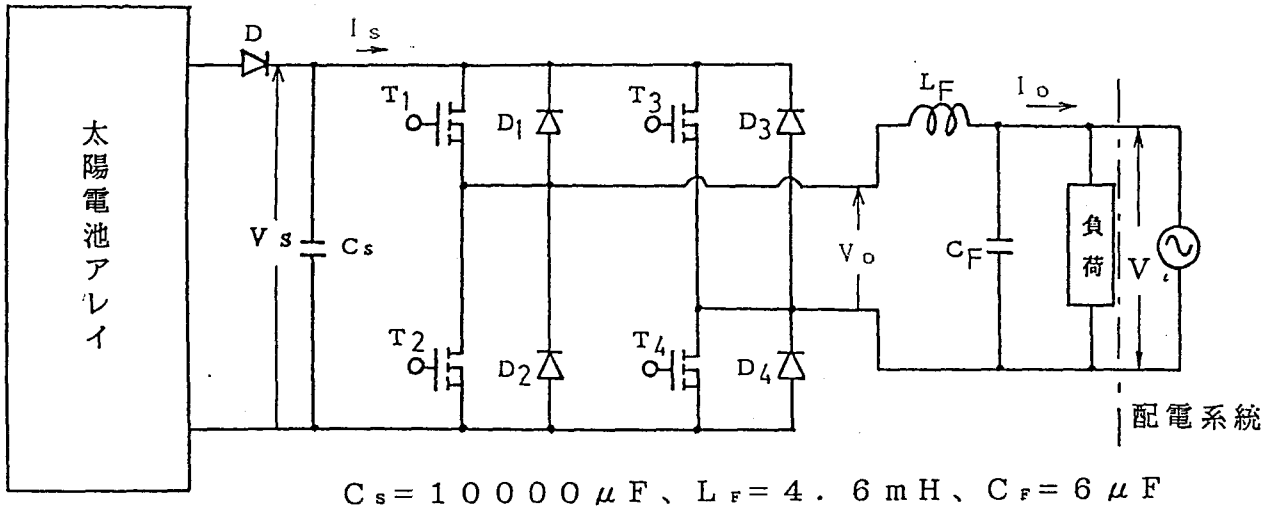
(a) 太陽電池は日射量や温度によって出力が大きく変動することから、常に太陽電池出力の最大出力点附近で動作させると同時に、インバータと負荷あるいは系統間での有効、無効電力の授受が可能なこと。

(b) 系統において故障が生じた場合、系統側に発電電圧が現れないようにインバータを停止すると同時に、回復後の再起動がスムーズに行われること。

(c) 日の出および日没の日射量を判別して、運転停止の自動化が可能な発電システムであること。

５・３　最適なインバータ制御方式

系統連系用インバータを設計する際に要求されることは、気象変動や負荷変動に追従した制御方式とインバータ動作を高周波化させて高調波低減とフィルターの小型化を図り、損失の少ない回路方式を取入れることである。しかし、インバータ動



C_s＝１００００μＦ、L_F＝４．６ｍＨ、C_F＝６μＦ

T_1～T_4：２ＳＫ３２５

D_1～D_4：６ＤＧ１１

図５－１　個人住宅用太陽光発電システム

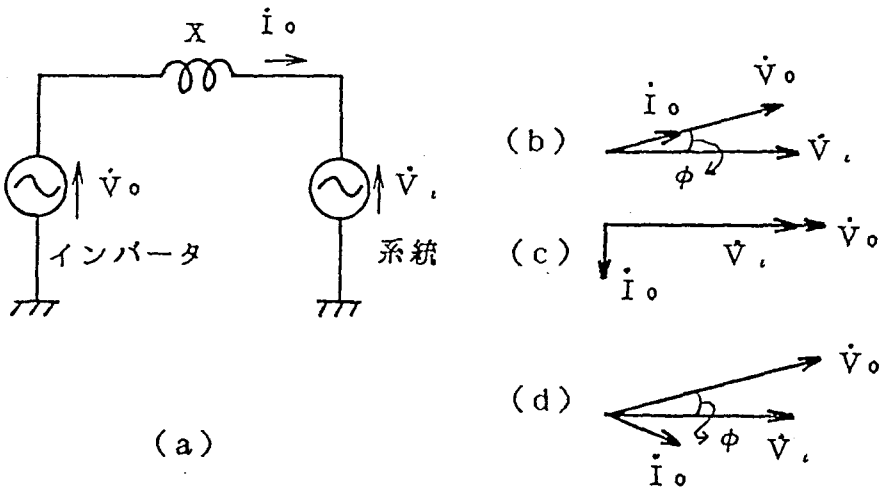


図５－２　インバータ出力電圧と系統電圧間の等価モデル図

作が高速化されたことによる制御素子のターンオン時の遅れ時間が、素子同志の同時通電、あるいは帰還ダイオードの逆回復時間内に生じる短絡電流などによって、素子能力が低下することから高周波化には限界があった。

本方式は、太陽電池の出力電圧が日射量の増加に対してわずかに増加する点に着目し、太陽電池の微増電圧をインバータ入力の制御関数に取り入れてインバータ制御素子のオン・オフ動作を行った。ＰＷＭインバータの制御素子には高周波動作が可能なＭＯＳＦＥＴを用いて、スイッチング動作を高速化し高調波低減をはかった[13)-(15)]。ドライブ回路には、短絡電流抑制用に開発したソフトドライブ制御方式をとり入れて回路動作の安定化を図り、フィルタの小型化とスイッチングおよびフィルタ損失の低減化を図った[16)-(20)]。

気象や負荷変動に対応した追従制御を取入れ、回路動作の高速化と損失低減を考慮して開発した個人住宅用太陽光発電システムの回路構成を図５－１に示す。アレイの発電出力は、ＰＷＭインバータで直流－交流変換を行った後、フィルタを通って負荷あるいは系統へ有効電力が供給される。インバータ出力と系統間に挿入されたインダクタンスL_Fは、フィルタの役目を果たすと同時に、有効電力を系統に注入するための連系リアクトルも兼ねている。また、アレイ出力端のコンデンサC_sは、２章で述べた動特性による振動抑制の面から決るが、ここではインバータ出力基本波電流に基ずく電圧変動抑制の面から決定される。Ｄは逆流防止用ダイオードである。

インバータ出力基本波電圧（インバータ電圧）V_oがひずまない条件は、アレイの最大出力点における直流電圧V_sが、日射量やアレイ温度の変化に対して常に、$V_s > |V_{o\,max}|$（実際には多少余裕をみて系統電圧最大値の約１０％増し）の範囲内で運転されなければならない。また、C_sは許容電圧変動（出力電圧の歪に影響）の面から、容量に見合った無効電力調整も可能となる。

いま、図５－１に示したフィルタL_FにもとづくリアクタンスをＸとすれば、インバータ出力電圧V_oと系統電圧V_iの関係は、図５－２（ａ）に示す等価モデルで表わすことができる。図より両者の関係をベクトル表示した場合、同図（ｂ）のようにインバータ出力電圧V_oを系統電圧V_iに対して進み位相とすれば系統に有効電力が供給される。また、（ｃ）のようにインバータ出力電圧を制御すれば、所望の無効電力制御（系統に対して遅れ電力）が可能となる。（ｄ）は有効電力と無効電力（系統に対して進み電力）を同時に制御した場合のベクトル図である。

インバータ電圧V_oと系統電圧V_iとの間には、

$$V_o = \kappa V_i e^{j\phi} \qquad (5-1)$$

ただし、ϕ：微少量

κ：無効電力に見合った１に近い実数

の関係が成立つことから、インバータから系統へ注入される基本波電流I_oは次式で与えられる。

$$I_o = \frac{\kappa V_i e^{j\phi} - V_i}{jX} = \frac{\kappa V_i \sin\phi}{X} - j\frac{(\kappa\cos\phi - 1)V_i}{X} \qquad (5-2)$$

ここで、ϕは微少量であるから$\sin\phi \fallingdotseq \phi$とすれば、

$$I_o = \frac{\kappa\phi V_i}{X} - j\frac{(\kappa\cos\phi - 1)V_i}{X} \qquad (5-3)$$

よって、インバータから系統へ供給される有効電力P_oおよび無効電力Q_oは、（５－４）式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned} P_o &= \frac{\kappa\phi V_i^2}{X} \\ Q_o &= \frac{(\kappa\cos\phi - 1)V_i^2}{X} \end{aligned}\right\} \qquad (5-4)$$

（５－４）式よりϕを制御すれば有効電力がまた、κを制御することによって無効電力調整を行うことができる。

図５－３は、素子温度が２５℃におけるアレイの電圧－出力特性を日射量をパラメータに示したものである。図より、最大出力点（P_{max}）におけるアレイ電圧が日射量の増加に伴って微増傾向を示す。このアレイ微増電圧を、制御素子のオン・オフ制御信号にとりいれて素子を駆動することにより、日射量および温度変化に対してアレイ出力の最大出力点附近でインバータ動作が可能な制御方式を採り入れた。アレイで発電された電力は、インバータ出力電圧と系統電圧間に挿入された連系リアクタンスＸのわずかな位相差ϕによって系統へ注入される。

有効電力P_oはインバータ損失がないと仮定した場合、図５－３に示す最大出力点軌跡に沿てアレイ電圧V_sの一次関数で表わされるから、

$$P_o = A(V_s - V_R) \qquad (5-5)$$

ただし、Ａ（Ａ＞０）、V_Rは定数

となる。（５－５）式を満足するように位相差ϕを制御すれば、P_oは必然的にアレイ最大出力点P_{max}に等しくなる。ゆえに、位相差ϕは（５－４）、（５－５）

式より次式で与えられる。

$$\phi = \frac{AX}{\kappa V_i^2}(V_s - V_R) \qquad (5-6)$$

理論式（５－５）（５－６）に基づいた制御方法を、負荷への供給電力P_oが増減した場合について図５－３を用いて説明する。

(1)軽負荷時：インバータ出力P_oが減少したことにより、インバータ入力$P_{o(Vs)}$も減少する。$P_{o(Vs)}$の減少により、インバータ動作点はアレイの最大出力動作点より低い電圧領域で動作し、負荷が軽くなった分の電力差はコンデンサC_sに充電される（図５－４）。その結果、直流電圧が上昇して同図①に示すようにインバータ動作点は最大出力点に向かうよう制御される。

(2)重負荷時：P_oの増加により、インバータ動作点はアレイの最大出力動作点より高い電圧領域で動作することから、不足分の電力をC_sが放電して直流電圧を低下させ、②のように最大出力動作点に向かうよう制御される。

また、V_Rはアレイの温度上昇を考慮すると（５－７）式で与えられる。

$$V_R = V_{RO}(1 - a\Delta T) \qquad (5-7)$$

V_{RO}は２５℃におけるV_Rの値、ΔTは２５℃からの温度偏差、ａは温度によりわずかに変化する関数で（$\fallingdotseq \Delta V_R / \Delta T \fallingdotseq 0.003$［Ｖ／Ｋ］）、アレイの温度上昇と共に自動的に低下するように調整することが望ましい。

このシステムは、κを制御することにより無効電力調整も可能となるが、個人住宅用の小規模分散型システムにおいて系統の無効電力まで補償することは、制御回路の複雑化やコスト高を招きあまり得策とはいえない。従って、本制御方式では、インバータ容量を最小にするために有効電力のみを系統へ送出する力率１の制御を行っている。その結果、（５－４）式におけるκの値は１（$\kappa \cos\phi = 1$）となる。

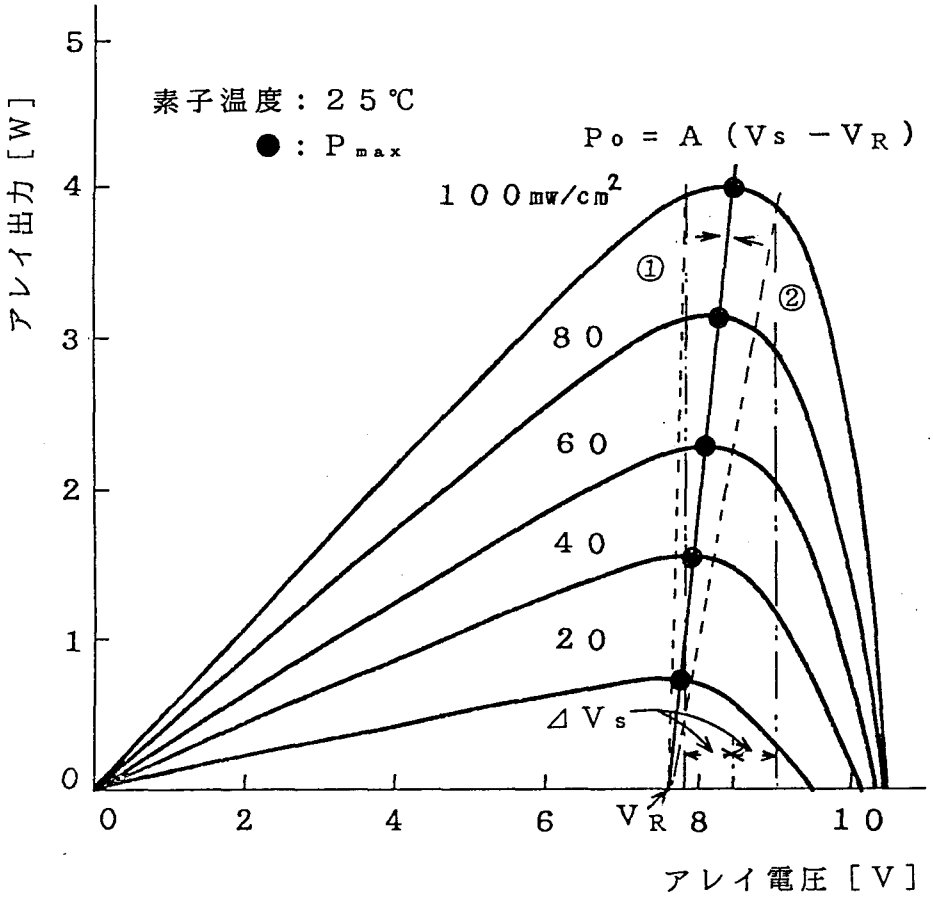


図５－３ アレイ電圧－出力特性

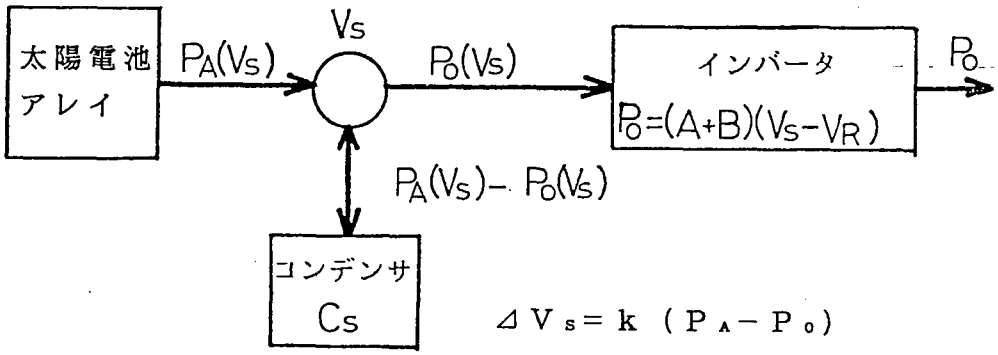


図５－４ アレイ出力とインバータ入力との関係

5・4　インバータ損失の算出

これまではインバータ損失を無視して議論を進めてきたが、実際にインバータ動作を扱う場合、インバータ損失P_Lを含めて考えなければならない。今、損失を含めたインバータ入力電力をP_{IN}とすれば、

$$P_{IN}=P_0+P_L=A\ (V_s-V_R)\ +P_L \qquad (5-8)$$

で与えられる。インバータは効率向上をめざして高周波化が進み、スイッチング損失の少ない半導体素子や低損失部品の採用、フイルターの小形化などがはかられた結果、主要動作領域内における入力変化に対して効率はほとんど変化しなくなった[31]。効率が一定であるとすれば、P_LはP_0の増加に対して比例することになり、インバータ損失P_Lは近似的に次式で与えることができる。

$$P_L=B\ (V_S-V_R) \qquad (5-9)$$

ただし、Bは定数（B＞0）

ゆえに、インバータ入力P_{IN}は（5－8）（5－9）式より次式で与えられる。

$$P_{IN}=(A+B)\ (V_s-V_R) \qquad (5-10)$$

インバータ損失からBを知ることができれば、図5－5に示すようにAを補正することによって、インバータ損失を無視した場合と同様な制御が行える。また、アレイの温度変化による動作点のずれに対してA、V_Rを季節毎に微調整すれば最大出力点制御を行うことができる。さらに、日射量の低下に対して、ドライブ電力やインバータ損失を含めた動作時の内部消費電力を、アレイの発電出力より得ることができない程日射量が低下した場合はインバータを停止するようにした。

5・5　制御系の構成

種々の諸条件を考慮して開発した太陽光発電用インバータの制御ブロックを図5－6に示す。また、図の各部分にはインバータ動作時における模式的な波形例を載せた。

(1)日射量変動に対しては、三角波の波高値V_tをアレイ出力電圧にV_s比例させて、

(2)系統電圧変動に対しては、正弦波信号波の振幅を系統電圧V_iに比例させて行っている。

(3)電力の授受および温度変化に対しては、π／2進んだ系統電圧jV_iを、系統電圧の実効値で除した値と微増電圧（V_S-V_R）との積に系統電圧変動分κV_iを加えて行っている。

(4)位相差ϕは、系統電圧の変動幅とアレイ電圧の変動幅より決定される微小変化量をとることから、本試作装置における位相差の最大変化幅を10°に設定し

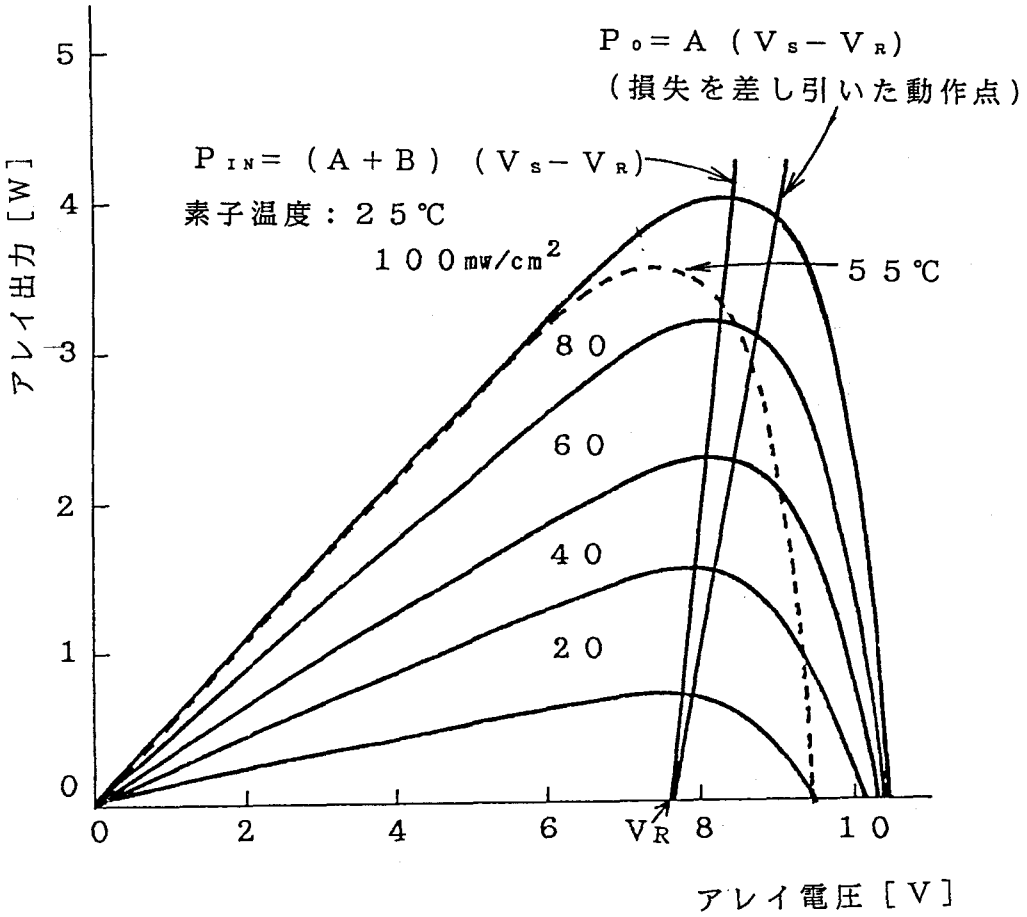
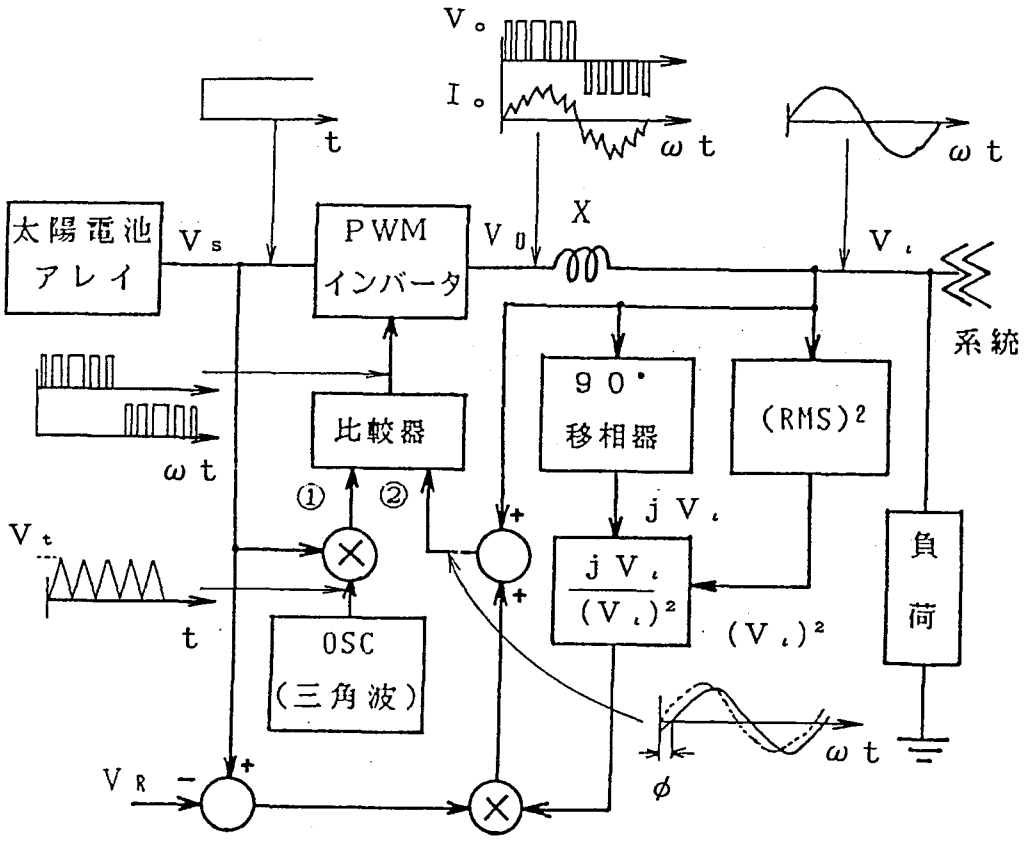


図５－５ アレイ電圧－出力特性に対するインバータ入力特性



① 三角波振幅 ∝ $V_t V_s$ （V_t：三角波々高値）

② 正弦波信号波振幅 ∝ $(1 + j\phi) V_i = V_i e^{j\phi}$

図５－６ 制御ブロック図

て行った。
最後に、①キャリア周波数の三角波振幅値と②出力周波数の正弦波信号波振幅値が決定され、この両信号波を比較してＰＷＭインバータを構成する制御素子（ＭＯＳＦＥＴ）のゲート駆動用信号としている。さらに、インバータ損失を含めた式（５－１０）の関係を満足さることによって、アレイは常に最大出力点において動作するよう制御される。

５・６　試作装置の運転特性

試作した系統連系用ＰＷＭインバータと配電系統とを直接接続する方法として、安全性の面から模擬系統に電動機－発電機（ＭＧ）を用いて行なった。また、太陽電池アレイは、４章で試作した太陽電池シミュレーター（図４－６）を、また負荷には抵抗を用いた。特性上に示す各番号①～⑥は、系統電圧一定の下でインバータの動作周波数が１０［ｋＨｚ］時の動作点である。動作点は、直線（Ｉ）が示す最大出力点附近において運転されていることがわかる。
直線（Ⅱ）（①′～⑥′）は、インバータ損失P_Lを差引いた場合のインバータ動作点であるが、負荷をかける程インバータ損失が増している（図５－８（ａ））。これは、アレイ電圧の最大値が５５［Ｖ］と低く、インバータ動作電圧が４０［Ｖ］附近となることから、ＭＯＳＦＥＴのオン損失（R_{ON}＝０．５［Ω］）の増加が避けられなかったことによる。直流電源（１００［Ｖ］、１０［Ａ］）を用いて行った動作周波数１０［ｋＨｚ］におけるインバータ損失は１．２％弱となった[40]。
（ｂ）は各動作点における力率特性で、常に９０％以上の結果が得られた。
図５－９は、インバータを②′の動作点で運転中の、インバータ出力電流I_oと系統電圧V_iの波形例である。（ｂ）は出力電流の高調波含有率を基本波成分をもとに計算したもので、高調波の少ない交流電流を系統へ供給している。
また、図５－１０（ａ）（ｂ）は、アレイの発電電力をインバータから負荷へ供給している定常運転状態において、日射量あるいは系統電圧が急変した場合の運転特性の安定性についてみたものである。（ａ）は、インバータを⑤′の動作点で運転中、日射量を②′へステップ状に増加させた時の応答特性である。アレイ出力端に挿入したコンデンサーC_sが大きいことから、６５０［ｍｓ］と急俊な応答は見られないが、日射量の変化に対して制御系が安定に動作をしていることを示している。
また（ｂ）は、インバータを②′の動作点で運転中系統電圧をステップ状に低下させた場合の応答特性である。系統電圧が低下したことにより、インバータ出力電流I_oが増加して負荷に供給される電力を一定に保もつよう制御されている。

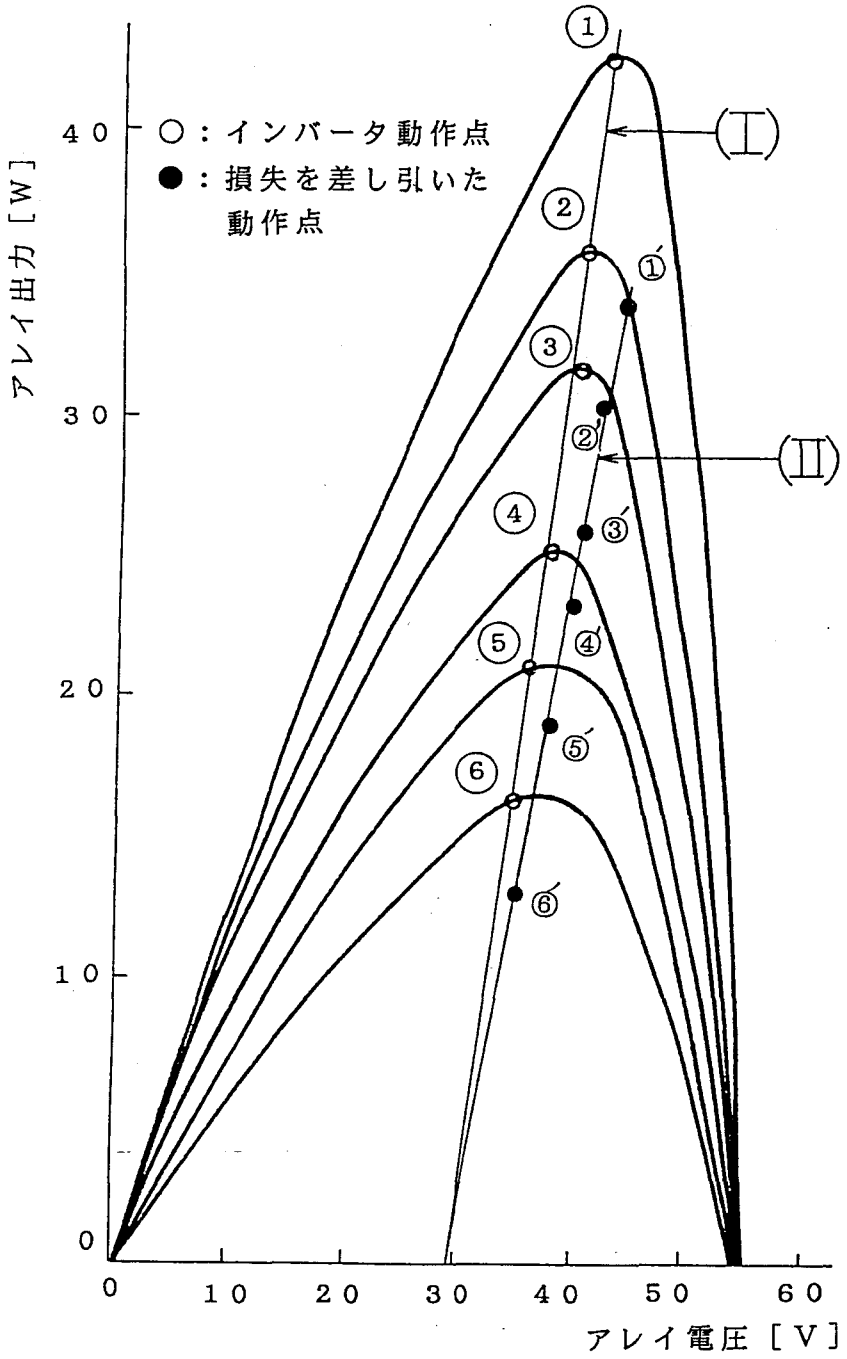
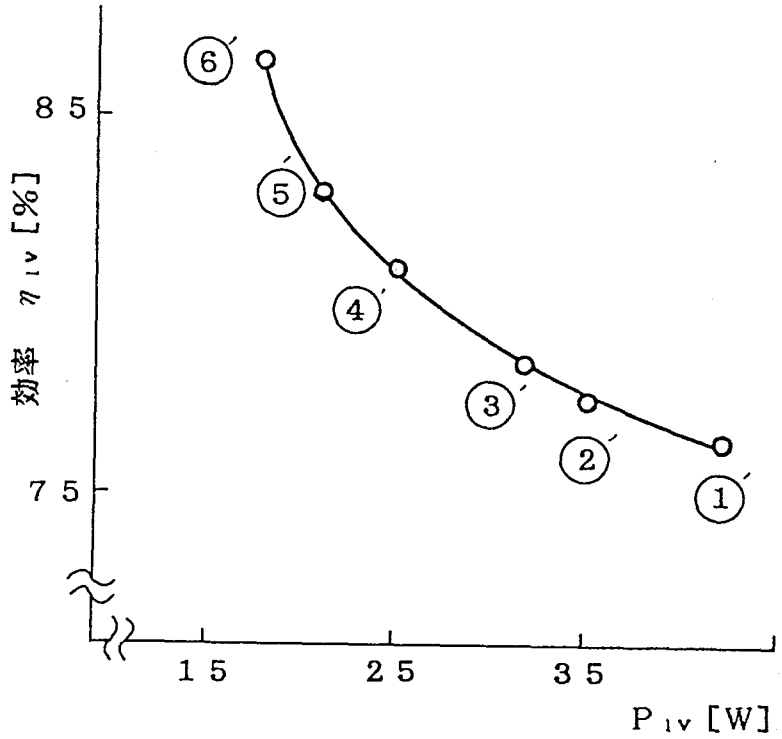
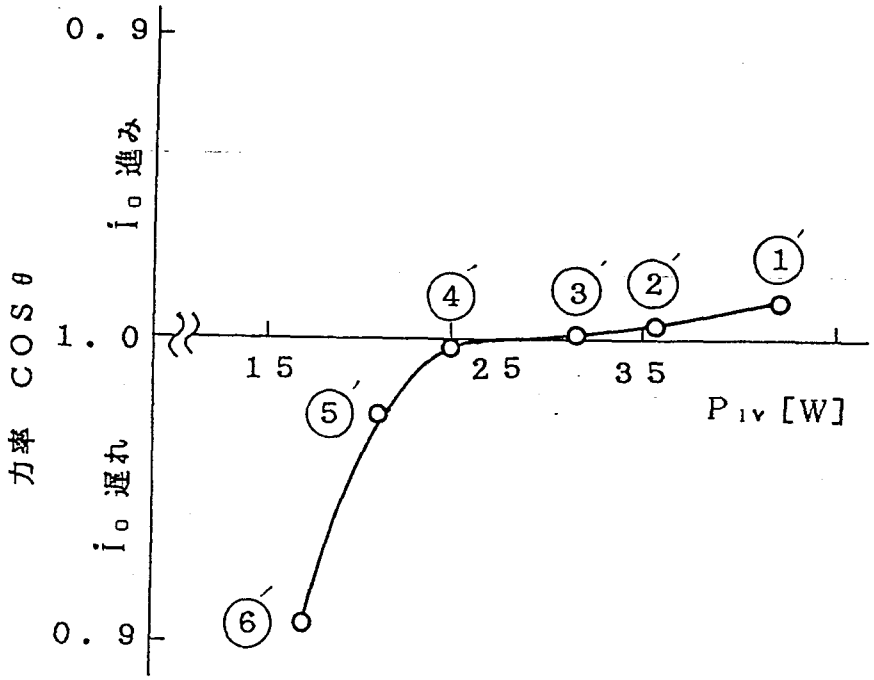


図５－７ アレイのシミュレータ特性



（a）効率特性



（b）力率特性

図5－8 インバータの出力特性

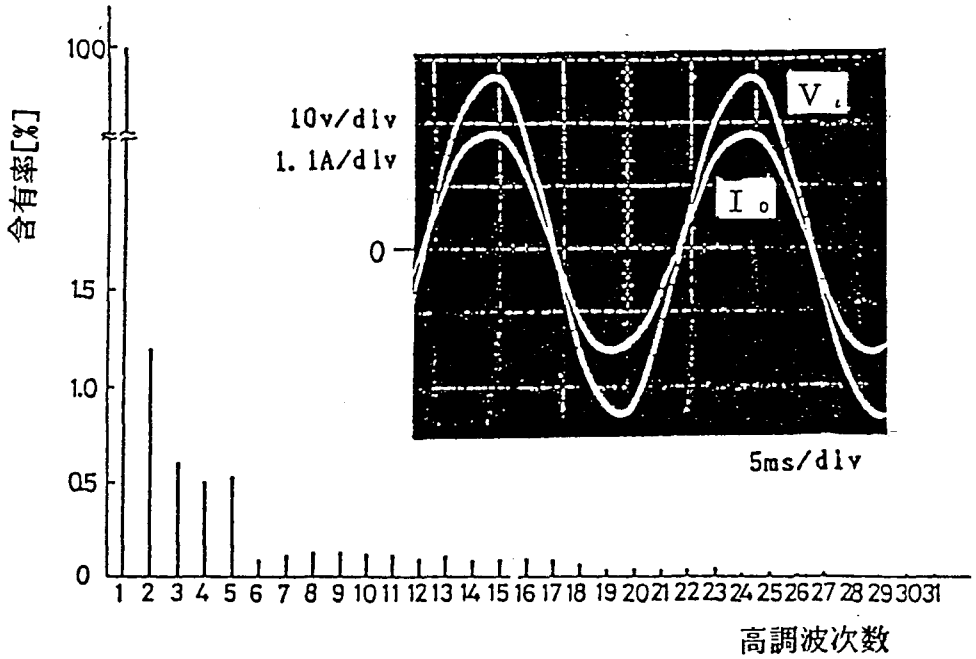
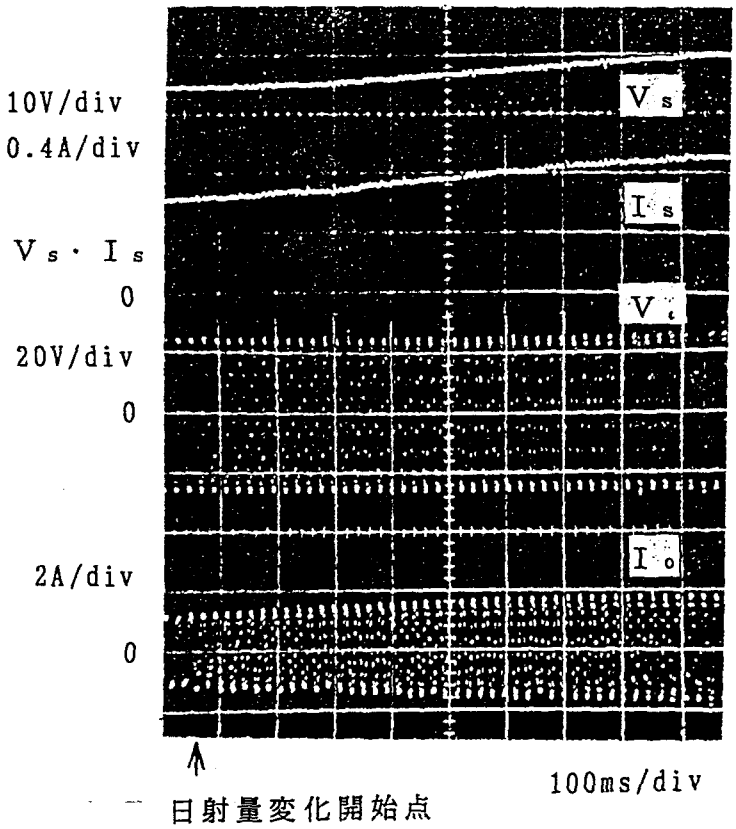
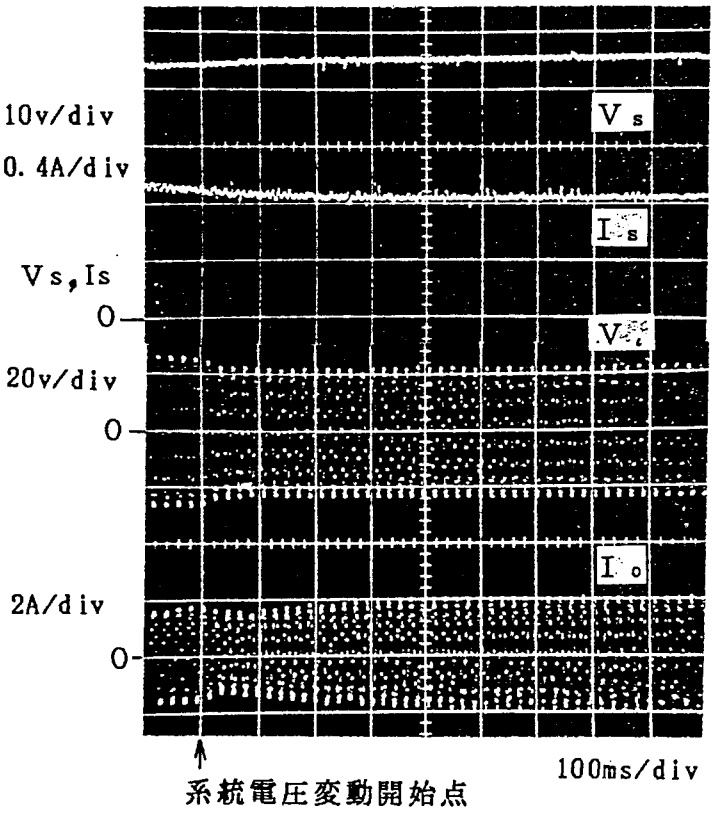


図５－９ インバータ出力電流と系統電圧波形例
および出力電流の高調波含有率



（a）日射量変動に対する応答特性



（b）系統電圧変動に対する応答特性

図５－１０ 試作装置の制御特性

以上の結果から、開発した系統連系用ＰＷＭインバータは、日射量や系統電圧の変動あるいは、インバータと系統間の電力授受に対しても安定に運転されていることが実証できた。

５・７　まとめ

系統網の発達した我が国における太陽光発電用インバータは、逆調ありの系統連系方式が望ましいとの観点から、電圧形ＰＷＭインバータの制御方式を開発してきた。まず、スイッチング素子に高速動作が可能でスイッチング損失の少ないＭＯＳＦＥＴ用いて高調波の減少とフィルターを小形化し、運転時の内部消費電力の低減化を図ることができた。また、ドライブ回路に短絡電流抑制用に開発したソフトドライブ制御方式を採り入れて、回路動作をさらに高速化させた。

アレイの最大出力制御方法として、アレイの電圧－電力特性より、アレイの電圧が日射量の増加にともなって増加傾向（温度一定）を示すことに着目し、アレイの増加電圧をインバータ入力の関数にとり入れて、日射量および温度変化に対して最大出力点附近でインバータを動作させる最適化制御方式を確立した。こうすることによって、発電出力はインバータ出力電圧と系統電圧間のわずかな位相差ϕによって系統へ送出される。

このような制御方式をとりいれた電圧形ＰＷＭインバータを試作して、種々の条件下における運転特性を検討した。模擬系統に電動機－発電機（ＭＧ）を、太陽電池には太陽電池シミュレータを用いて行った運転特性（系統電圧を一定）におけるインバータ動作点は、ほぼ設計通り最大出力点附近で運転されていることが分かった。インバータ変換効率は８０％台、各動作点における力率は９０％以上であった。

さらに、インバータに含まれる高調波含有率は第１調波０．６％、第３調波０．５％、第２、４調波はそれぞれ１．２、０．４５％と高調波の極めて少ないインバータを開発することができた。さらに、定常運転において日射量変動時０．６５秒また、系統電圧変動時約０．２秒で応答させることができた。

逆調ありの系統連系方式をとりいれた太陽光発電用ＰＷＭインバータの最適化制御方式は、電力の授受や日射量および系統電圧変動などに対しても、常に安定に運転されていることが実証できた。

最後に、本システムは個人住宅用小規模システムとして開発したことから、無効電力調整は行なっていない。しかし、共同住宅あるいは工場用などの中規模システムでは、電圧変動抑制用に挿入されたアレイ出力端のコンデンサC_sに見合った無効電力調整を行うことにより、変電所内における調整用設備を軽減できる。

参考文献

(1) D.A.Fox,K.C.Shuey,D.L.Stuhachulte：Peak Power Tracking Technique for Photovoltaic Arrays. PESC 1979 p219-227K.

(2) 北川、他：太陽光発電システム　サンケイ技報　Vol.14 1984

(3) 大西、沖津、他：マイクロコンピュータによる太陽光発電最大出力追従制御システム 電気学会四国支部大会 No.9 1982

(4) 大西、沖津、他：マイクロコンピュータによる太陽光発電電力変換システム 電気学会全国大会 No.502 1983

(5) 大庭、他：太陽光発電システムの最大出力追従制御方式　電気学会論文誌 B-106. No.7 1986

(6) 木田、他：太陽電池の自励式最適動作点制御　電気学会全大 No.499 1990

(7) 上之園、他：太陽光発電用変換装置 東芝レビュー Vol.35 No.12 1980 pp1065-1068

(8) 川平、市東、江口、徳永：太陽光発電システムの開発 日立評論 Vol.63 No.7 1982 p25-28

(9) 原島、他：太陽光発電システムにおけるエネルギーフロー制御 電気学会 半導体電力変換研究会 SPC-84-1 1984

(10) 逸見、岩堀、山形、池田：自然環境エネルギー発電システムに関する研究 電気学会論文誌　Vol.107-B No.8 1987

(11) M.F.Schlecht：A Line Interfaced Inverter with Active Control of the Output Current Waveform. IEEE PESC 1980 p234-241

(12) 浅井：太陽光発電用ＰＷＭインバータ 電気学会半導体電力変換研究会 SPC-83-11 1983.p41-50

(13) 逸見、岩堀、高橋、池田：太陽光発電システム開発に関する諸考察 電気学会 半導体電力変換研究会 SPC-82-48 1982　p1-10

(14) 逸見、岩堀、高橋、古川、池田：太陽光発電用変換装置とその制御に関する研究 電気学会半導体電力変換研究会 SPC-84-25 1984　p39-48

(15) 船渡、逸見、藤倉、小野田、池田：電圧型ＰＷＭインバータに用いるパワＭＯＳＦＥＴの動特性の考察 電学全大 487 1988

(16) 逸見、船渡、池田：ＰＷＭインバータの短絡電流抑制と損失評価　電気学会 論文誌 Vol.9 D-94 1991

(17) 池田、逸見：ＰＷＭインバータ用半導体電力変換器の電力損失評価と電力定格決定法に関する考察 中国電子学会技術学会論文 86-3 1986

(18) 関沢、逸見、入口、池田：ＰＷＭ制御における電力用半導体素子の損失評価（Ｉ）電気学会半導体電力変換研究会 SPC-85-59 1985 p1-10

(19) 池田、逸見、的矢、船渡：ＰＷＭ制御における電力用半導体素子の損失評価（II）電気学会半導体電力変換研究会 SPC-87-8 1987 p67-76

(20) Y.Ikeda, J.Itsumi, H.Funato: The Power Loss of the PWM Voltage-Fed Inverters.19th PESC II-C-5 1988 p277-283

第６章　結論

地球環境問題がクローズアップされてきたことにより、自然エネルギーの重要性が再び叫ばれ始めてきた。中でも供給量が膨大でクリーンなエネルギー源である太陽光発電は、ここ５～６年における目覚ましい研究開発と量産技術によって、太陽電池コストはＷ当り６００～８００円に到達し実用化に今一歩のところにまできている。
また、ＮＥＤＯによる新エネルギー導入フィールドテストが９２年度から始められ、それに合せて逆潮流が電気事業法で認められたこともあって、普及化に一層弾みがついてきた。

本研究はこれを一歩進めて、太陽光発電を設置する際に必要な周囲の環境状況や太陽電池の最適な設置方法、自然エネルギーの効率的な運用方法、系統連系用システムの最適化制御方法などに関する研究成果を第２章から第５章にわたって述べてきた。本章は、これらの研究によって得られた成果をまとめたものである。

（１）気象条件に適した太陽電池の最適化設置方法を検討し、以下の諸点を明らかにした。

①散乱日射量成分の多い我が国の各地域における最適な傾斜角は、各地域の緯度から１１°を引いた値が最適値となる。
最適な傾斜角に設置された太陽電池からは、水平面に対して年間平均で約１７．５％も多く発電できる。

②雲や建物、樹木などの影響によりセルの一部が遮光されると４０％近い発電出力が失われると同時に、遮光されたセル両端には他のセルによる発電電圧が逆方向に加わる。この逆電圧がセル耐圧を越えると突入電流が流れてホットスポットを生じ、時にはセルを損傷に導く原因となることを示し、その対策法を明らかにした。

（２）太陽光発電システムの設置場所で、各モジュールの出力特性を短時間に評価できる簡易測定器を開発した。これにより、運搬時や工事中に生じる損傷状態や光劣化などによる特性変化の評価を可能にした。

（３）気象変動に追従して変化する太陽電池出力の最大出力点で常に運転される目的で挿入される制御装置は、高調波低減や回路損失低減などから高速でオン・オフ動作が繰り返される。その際、配電線によるインダクタンスと太陽電池の接合容量による共振によって、太陽電池出力端に振動電圧・電流が生じることを示し、その対

策法を明らかにした。

（４）アモルファス太陽電池の光劣化現象を経時変化法により調査し、夏季の温度上昇によるアニール処理効果が光劣化抑制に効果的に作用しているを確認した。この抑制効果に着目して、外部から劣化した試料を直接アニール処理する集光加熱装置を試作し、５年間で発電出力が６０％近くに低下していたアモルファス太陽電池を、アニール温度を１００～１１０℃に保って１２０分間アニール処理した結果、発電出力を最高で７６．７％にまで回復できた。
この結果をもとに行ったシミュレーション結果より、光劣化の進行を効果的に抑制するには、発電出力の低下が著しい１月頃に毎年１回アニール処理すれば、１０年後の発電出力をほぼ２倍以上に維持できることを明らかにした。

（５）自然エネルギーに太陽光発電と風力発電を併用し、蓄電池電圧を利用して各発電源出力端にチョッパを挿入し、出力電流最大値のみを検索するだけで最大出力制御が可能なシステムを試作し、日射量、風力および負荷変動などに対するシステム応答特性を０．３秒以内におさめた。
併用システムは、１チップのＣＰＵとチョッパだけの簡単な回路構成で、最大６個の自然エネルギーを同時に最大出力点制御が可能であり、個々の発電システムを用いた場合に比べて建設コストを２７．６％軽減でき、月平均４５００円程電力料金が安くなることを示した。
さらに、併用システムにすることによって未利用の自然エネルギーが利用でき、稼働率も６０％以上に達し電力設備容量の縮小化が図れることを示した。

（６）個人住宅用太陽光発電システムとして、逆潮ありの系統連系用ＰＷＭインバータのを開発した。スイッチング素子に、高速動作が可能でスイッチング損失の少ないＭＯＳＦＥＴ用いて回路を小形軽量化し、また、インバータ動作時に生じる短絡電流抑制用に開発したソフトドライブ方式をとり入れて、回路動作の安定化を図った。
インバータ制御方式に、日射量の変化に伴って僅かに増減するアレイ電圧の変化分をインバータの制御関数にとりいれて、日射量や負荷変動に対する最大出力点制御および季節毎に変化するアレイ電圧や温度変化に対しても追従できるようにした。
発電出力に含まれる高調波含有率は２％以下、日射量や負荷および系統電圧変動に対いする応答特性を０．６秒以内に抑えた。

世界中の科学者の大半が、化石エネルギー（石油）の埋蔵量はほぼ２０～３０年が峠であろうと予測している。あと７年余りで２１世紀、この時代のエネルギー源を何に求めるのかは世界各国の重大な課題である。少なくとも、巨大エネルギー源として研究開発が続けられている核融合はまだ先の話だ。このようは背景の下に、オイルショック以来湿りがちだった自然エネルギー開発が、今度は資源枯渇や地球をとりまく環境問題といった面から再登場してきた。

本論文は、自然エネルギーの一つである太陽光発電に的をしぼって、小規模分散形として個人住宅や共同住宅、学校やビルなどの屋根、工場の敷地などを利用して発電すれば大きなエネルギー源となるシステム設置方法ならびに最適な制御方式などについて研究・開発を行ってきたものである。

２１世紀のエネルギー源として、太陽光発電システムの導入を予定あるいは計画図る際、この研究がいささかでも貢献できれば幸甚と考えている。また、太陽光発電の普及・実用化が一層進むことを期待したい。

付録１　太陽光発電システムの諸外国における開発状況

１・１　日本における太陽光発電の開発状況

１９７４年に発足した“サンシャイン計画”のもとで、新エネルギー総合開発機構（ＮＥＤＯ）が中心となって、広範囲の利用分野を対象に開発が進められてきた。サンシャイン計画では、２０００年頃をめどに他の発電システムと同程度の経済生を有するシステム開発を目標に技術開発が進められている。

開発の中心：

①低コスト高性能太陽電池の開発。

②太陽電池の利用技術開発の２本柱としている。

サンシャイン計画発足当時、２～３［万円／Ｗp］もした太陽電池も１９９２年には、５００～８００［円／Ｗp］に手が届くところまでにきている。

電力用太陽電池の主流は単結晶、多結晶であり、周辺機器の開発が進んだことから適用分野も広がりつつある。昨年からは、ＮＥＤＯを中心に太陽電池製造メーカと協同して公共施設への導入強化を図っており、９２．４月からは逆潮流も可能になったことから、今後、太陽光発電システムの普及が急速に進むものと思われる。

日本における太陽光発電システム開発状況の一例を付録表１示す(1)-(6)。

１・２　アメリカにおける太陽光発電の開発状況

米国が太陽光発電の開発にかける予算および人員は他国に比べて１桁以上大きく、オイルショック後のエネルギー開発力には著しいものがある。米国の太陽光発電計画は大きく分けて地上用発電計画と宇宙用発電計画の２つがあり、前者は１９７２年にＮＳＦ（National Science Foundation）で、後者はＮＡＳＡで進められその後エネルギー研究開発庁（ＥＲＤＡ：Energy Research and Developument Administration）に、１９７７年１０月からエネルギー省（ＤＯＥ：Department of Energy）の管轄に移されると同時に、ＳＥＲＩ（Solar Energy Research Institute）研究所も開設さた。

１９７８年１０月に太陽光発電システムに関する法律が制定され、１９７９年会計年度以降１０年間に１５億ドルをこの分野に投入することが承認された。

１９８４年からスタートした５ケ年計画では、結晶シリコンを中心とする原料からモジュールまでの低コスト化研究、リボン結晶や多結晶、アモルファスシリコンおよび高効率セル並びに発電システムの研究まで多岐にわたっている。２０年後には、アメリカの全電力需要の５～１０％を太陽光発電システムで供給する目標である。

また、国内に電源コストの高い遠隔地を多く抱えていることもあって、研究開発と平行して税制措置の導入政策も取られている。米国における太陽光発電システム開発状況の一例を付録表２に示す[7][8]。

（Ｉ）ＤＯＥの開発プログラム：開発目標として２０００年には、石油換算で２７００［万ｋｌ／年］のエネルギーを太陽光発電で代替えするとしている。価格目標値は３段階に分けられており、１９８２年までにモジュール価格を２．８[$/Wp]に１９８６年に０．７[$/Wp]、そして１９９０年には０．１５－０．４[$/Wp]を実現させている。開発計画は、①計画の立案、評価、統合　②先端技術の研究　③技術開発　④システムエンジニアリングと標準化　⑤試験、応用技術　⑥商品化（10年以上にわたるもの）。米国では、これらの分野を各機関毎に特定の開発責任を与えて、依託研究を行うという分離型の体制で開発を行っている。

（II）ＪＰＬ（Jet Propulsion Laboratory）：ＤＯＥ計画の内、①③④⑤の技術開発と応用分野を担当している。１９８６年までに、0.7[$/Wp]を目標に設定し、低価格なソーラアレイの製作技術および量産技術の開発、商業ベースへの移行とニュウタイプの太陽電池開発を大学や企業に依託して積極的に進めている。
（III）ＳＥＲＩ（Solar Energy Research Institute）：材料の技術開発から太陽エネルギー産業育成のための経済、市場の調査分析及び情報収集を行っている。

１・３　ヨーロッパにおける太陽光発電の開発状況

ヨーロッパでは、１９７５年ＣＥＣ(Cmmission of the European Communities)において以下のような課題で決定された。
①住宅へのソーラエネルギーの利用　②太陽熱の利用（１ＭＷｐプラン）
③太陽光発電　④光化学、光電化学、光生化学　⑤生物エネルギー　⑥副射熱
具体的な開発計画が１９７９年に始り、１９８３年６月に至るまでの４年間で４６００万ＥＣＵ（European Currenky Unit=0.94$）で推進されることとなった。
太陽光発電については、１５９０万ＥＣＵで推進され、(1)探索及び研究開発について３５の契約者（会社、研究所）に依託、(2)３０［kWp］～３００［kWp］のパイロットプラントの建設を１７社に依託し、太陽電池のコストダウンと長寿命化について、さらに、システムの気象変化に対する運転特性および設計条件などの研究を進めてきた。(1)については５０００万ＥＣＵの予算で材料、セル、部品、およびシステム、生産設備の研究開発を１９８８年までに進めていく。

サブシステム関係では、エネルギー貯蔵システムの開発、屋根及び地上のアレイ構造の開発、電力制御装置の開発。システム関係では応用分野の検討、大規模太陽光発電システム、風力発電やディーゼル発電などとの併用発電並びに大規模太陽光発電システムのネットワーク作りの検討などを行っている。
(2)における発電プラント開発プロジェクトの総予算が約４００００～７５０００万ＥＣＵで、現在１００［ＭＷp／年］の出力をもった生産規模を設置し運転中である。

西ドイツ：１９７６年に国家的プロジェクトとして、代替エネルギーの研究開発が推進され５年間単位で行われてきた。多年度計画予算であることから研究を長期、中期的視野に立って実地することができる。太陽光発電の分野では、国立研究機関であるＦＩＳＥＳ（Fraunhofev Institute for Solar Energy System）がリードして、低コスト太陽電池の基盤材料の研究に取りくんでいる。
西ドイツ最大の太陽電池メーカーであるＡＥＧ－Telefun kenは、大型自動化モジュールの生産プラントを完成させた。また、開発途上国にモデルプラントを建設するとともに、種々のアプリケーションについて意欲的な展開を図りつつある。
Siemensは、シリコン及びセルの新しいプラント計画を進めており１９８４年には２［ＭＷp］の生産を行った。ポンプメーカーとの共同開発により６００～２５００［Wp］のシステム開発を行い、太陽光発電に必要な部品及びシステム技術の開発を行っている。

フランス：Photowatt社は、１９８０年に３００［ｋＷp］を生産し、モジュールとして５［ＭＷp／年］の生産能力をもつラミネーションプラントを建設した。
一方２００［Ｗ］～４［ｋＷp］のポンピングシステム、アレイ構成部品等の開発を完成させ、さらに通信用の電源、海上ビーコン用電源、冷蔵庫用電源等の応用に向けて開発を進めている。また、France-Photonは、単結晶、多結晶及びモジュールアレイに関する技術ライセンスをSolaexrより受けて生産し、１９８５年に１［ＭＷp］に達している。

イタリア：イタリア政府は、太陽光発電に関する研究開発に積極的でＣＩＳＥ、ＥＮＩ、ＥＮＥＬ、ＥＮＥＡ、ＣＮＲ等のグループがこれらを進めている。
Ansaldoは、２００［ｋＷp／年］の単結晶及びモジュールの生産能力を有しており、１９８５年に１［ＭＷp］の計画を行った。またＳＧＯプラントの建設計画もある。

ＣＥＣの依託を受けてVol-canic島の避暑地用に８０［ｋＷp］の太陽光プラントを設置し、運転特性及び実証試験などのシステム評価を行っている。

ニュージランド：Helec Solar EnergyはSolarexよりライセンスを受け、Solarex－Semixの技術を用いた２０００［ｋＷp／年］のセル、モジュール生産を計画。また、ＣＥＣの依託を受けて５０［ｋＷp］のシステムを設置し研究を行っている。
ベルギー：ＣＥＣは６３［ｋＷp］のプラントを、スイミングプールのポンプ用電源として設置した。
ヨーロッパにおける太陽光発電システム開発状況の一例を付録表３に示す[1][9]-[11]。

付録表１　日本における太陽光発電システム開発状況の一例

年	システム名	主要仕様 規模[kW]	蓄電池	太陽電池	用途、その他	依託先	設置場所
1979	東京電力ｼｽﾃﾑ	1×2		富士(Si)	系統連系技術研究用	東京電力	東京都調布市
1980	ｼｬｰﾌﾟｿｰﾗﾊｳｽ	1.15			ｿｰﾗﾊｳｽ組入れデモ用	ｼｬｰﾌﾟ	奈良県天理市
	電力中研狛江	3×2		三洋(Si)	系統連系技術研究用 IV:他励式、自励式	NEDO	東京都狛江市
1981	電力中研赤城Ｉ	8		三洋(a-Si)	耐電圧劣化評価用	NEDO	群馬県宮城村
	三洋ﾓﾃﾞﾙﾊｳｽ	2		〃	ｱﾓﾙﾌｧｽ太陽電池ﾃﾞﾓ用 系統連系	三洋電気	大阪府守口市
	〃	0.4		〃	〃	〃	〃 枚方市
	京都街路灯	0.4		京セラ(Si)	照明蛍光灯10W.34本	NEDO	京都市鴨川畔
	中国電力ｼｽﾃﾑ	1		(Si)	系統連系技術研究用	中国電力	広島市
	風力・太陽光		240V/1400Ah	(Si)	神戸市の市章マーク電燈用	関西電力	神戸市
	複合発電	2	ｾｯﾄｲﾝ､ｱｳﾄ4-20m/s		風力1kW 同期発電機		
	白浜ｴﾈﾙｷﾞｰﾗﾝﾄﾞ（ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ）	1.1	24V/900Ah (7.2kWh)3日分	松下(Si) ﾘﾎﾞﾝ(Si)	ｴﾈﾙｷﾞｰﾊｳｽの電力供給用、瞬時切替 IV:Tr使用1.5kVA	松下興産	和歌山県白浜
1982	個人住宅	3	14kWh	富士(Si)	屋根一体型ｱﾚｲ 逆潮流防止 IV:Tr使用 常時並列　系統連系	NEDO	神奈川県横須賀市
	ｻﾝｼｬｲﾝｼﾃｨ庭園用	0.24		12社(Si)	照明20w.12本	NEDO	東京都ｻﾝｼｬｲﾝ60.
	中部電力ｼｽﾃﾑ	0.5×2		(Si)	系統連系技術研究用、固定式と集光追尾式の比較	中部電力	名古屋市
	九州電力ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	2	風力1kW		系統連系技術研究用	九州電力	福岡市
1983	集合住宅	20	114kWh	ｼｬｰﾌﾟ(Si)	住宅機器照明,IV:GTO使用 瞬時切替	NEDO	奈良県天理市
	光・熱ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ集光型	5	37kWh	ｼｬｰﾌﾟ(Si)	給湯、冷暖房、追尾集光照明、無断切替、水冷式		広島県坂町
1984	工場用	100	500kWh	松下(Si)	自動車ﾊﾞｯﾃﾘｰ初期充電用	NEDO	静岡県湖西市

					直流側並列　系統連系		
	関西電力ｼｽﾃﾑ	50		三洋(Si)	追尾集光、交流系統並列	関西電力	兵庫県姫路市
	第一家電ｼｽﾃﾑ	3	風力5kW	三洋(a-Si)	照明、ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	第一家電	東京都秋葉原
	京ｾﾗｿｰﾗｾﾝﾀｰ	43		京ｾﾗ(Si)	ﾋﾞﾙ照明	京ｾﾗ	千葉県佐倉市
1985	学校用	200	576kWh	日立,NEC(Si)	系統連系技術研究用、常時切替、逆潮流防止,IV:GTO使用	NEDO	茨城県筑波大学
	分散配置型	200	400kWh	(Si)	模擬配電線連系発電所ﾀｲﾌﾟ 25-50kW.6ｼｽﾃﾑ	NEDO	千葉県市原市
	電力中研赤城II	21		富士(Si)	系統連系技術実証用 2-5kW.7ｼｽﾃﾑ	NEDO	群馬県宮城村
	関西電力ｼｽﾃﾑII	10		(Ga-As)	追尾集光 IV:他励15kVA 交流系統並列	関西電力	兵庫県尼崎市
	離島形	50	305kWh	三菱(a-Si)	電力供給、独立型 街灯、ポンプ	NEDO	沖縄県座間味村
	離島形	25	115kWh		海水淡水化（電気透析法）	NEDO	長崎県福江市
	山間へき地	5	125kWh		ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟ用電源、北陸電力 小形燃料電池1.4kW	NEDO	富山県立山山麓
	集中配置型	1000	1800kWh	10社(a-Si.Si)	発電所ﾀｲﾌﾟ変電所母線へ	NEDO	愛媛県西条市
	東北電力研究ｼｽﾃﾑ	1.2		(Si)	個人住宅　SITｲﾝﾊﾞｰﾀ 系統連系	東北電力	宮城県仙台市
1986	木材発電ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	5	173kWh	(Si)	木材発電1.4kW	NEDO	静岡県水窪町
	ﾒﾀﾝｶﾞｽﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	30	240kWh	(Si)	ﾃﾞｰﾀ収集と解析評価 ﾒﾀﾝ20kW IV:3φ120kVA,1φ10kVA	NEDO	鹿児島県隼人町
	洋上	10	153kWh	(Si)	海洋牧場	NEDO	大分県佐伯湾
1987	離島形	30	87kWh	(Si)	海水淡水化（逆浸透法）	NEDO	広島県因島市
	ﾄﾝﾈﾙ照明	17	69kWh	(Si)	照明	NEDO	宮崎県南郷町
	放送ｻﾃﾗｲﾄ	36	360kWh	(Si)	照明	NEDO	北海道蛇田郡南羊蹄
	平板型ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	3.2	38kWh	多結晶(Si)	住宅内の電気、熱負荷 系統連系用、逆潮流防止 熱24kW	NEDO	神奈川県平塚市
	離島形ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ	100	1500kWh	(Si)	系統連系用試験システム ﾃﾞｨｰｾﾞﾙ 50kW	NEDO	福岡県京都郡苅田町
	実験用太陽光	200	無	(Si)	一般家庭用100戸分	NEDO	神戸市六甲ｱｲﾗﾝﾄﾞ

	発電システム				テレビ、冷蔵庫　系統連系 発電所タイプ		
1988	太陽エネルギー灯	0.3	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明	富士山	富士山頂
	ＡＢＣ（株）立川デモハウス	4.5	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明と換気	東京都	立川市
	モービルソーラステーション	5	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明とポンプ	ﾓｰﾋﾞﾙ	愛知県
1989	太陽光・風力	70 風力１ｋＷ		昭和ｼｪﾙ(Si)	照明・家電製品	NEDO	白馬山小屋・長野
	浜松ソーラエネルギー研究所	94	Si、多結晶、a-Si		独立・系統連系	NEDO	浜松市
	給油所	10.3		昭和ｼｪﾙ(Si)	コンピュータ電源	NEDO	甲府市
	電力館	10	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明	中部電力	愛知県碧田火力発電所
1990	休憩所	8.7	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明と換気	熊本県	阿蘇俵山茶屋
	道路鋲	37Wp		(Si)	道路表示		各都市
	灌漑用ハイブリッド	30 風力5kVA	京ｾﾗ	多結晶(Si)	ポンプ	NEDO	鹿児島県知名町
	マルチハイブリッド	32 水力3kW	京ｾﾗ	多結晶(Si)	照明	NEDO	鹿児島県工業技術センター
	防災システム	15.6		富士　(Si)	大型表示灯	NEDO	静岡県地震防災センター
	離島リゾート	2		富士　(Si)	電化製品	NEDO	沖縄県渡が敷島
	灌漑用	29		富士　(Si)	ポンプ	東京都	小笠原・母島
1991	公園システム	25	京ｾﾗ	多結晶(Si)	モニメント（時計、照明、噴水、スピーカ）	京ｾﾗ	千葉県館山市
	大型農事ハウス	300		ほくさん(Si)	ハウス内の負荷	NEDO	北海道上士幌町
	休憩施設	5.3		昭和ｼｪﾙ(Si)	照明、冷蔵庫、換気	屋久町	鹿児島県屋久町

付録表２　アメリカにおける太陽光発電システム開発状況の一例

年	設置場所	主要仕様			依託先
		規模[kW]	太陽電池	用途、その他	
1977	Nebraska	29.3	Si	農業の灌漑	
1978	Arisona	3.5	Si	インデアン村落電化	NASA
1979	California	49.6	Si	レーダ基地	MIT/LIN,Lab
	Ohio	15.3	Si	ラジオ中継用	DOD
1980	Florida	4.7	Si	フロリダエネルギセンター	
	Masachusetts	23.5	Si	住宅用照明　5System	
	New Mexico	36.1	Si	住宅用照明　8System	
	Utah(ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ)	105.6	Si	ﾃﾞｨｾﾞﾙ40kW、公園ビジネスセンター	Motorola/Spectro-lab/Arcosolar
1981	Masachusetts	7.8	Si	個人住宅	
	Hawaii	8.3	Si	個人住宅　3System	
	Texas	15.5	Si	ＥＴ Paso電気、独立電源	Sandia Lab
	New mexico	90.4	平板型Si	ショッピングセンター、IV:Helionetic	DOE/Sandia Lab
	Masachusetts	90.4	平板型Si	高校 、IV:Helionetic	
	Arkansas	240.4	Si	学校用光熱ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ、系統連系 30倍集光1軸追尾	ミシシッピー郡立大学
	Saudi Arabia	300	Si	太陽光発電プロジェクト（村落電源用）	
1982	Texas	27	Si	飛行場の電源	Sandia Lab
	New Mexico	47	Si	BDMブリッジ	Sandia Lab
	Hawaii	35	Si	病院用電源	Sandia Lab
	Arizona	225	Si	フエニックス空港、集光形 Solar Energy,Applied	DOE/Sandia Lab
	Oklahoma	135	平板型Si 多結晶Si	オクラホマ市博物館照明 Solarex IV:Windworks	DOE/Sandia Lab
	California	35	Si	工場用照明	
	Washington	300	Si	ジョジトン大学	OAK,RIDGE lab
	Akansasu	240	Si	学校用照明	OAK,RIDGE lab
	California	1000	Si	発電所ﾀｲﾌﾟ　電力会社に売電 500KVA2台	ARCO

注、MIT：マサチューセッツ工科大学　LIN：リンカン研究所 DOD：国防省 SERI：太陽エネルギー研究所
NASA：米国航空宇宙局 DOE:エネルギー省

付録表３　欧州における太陽光発電システム開発状況の一例

年	設置場所	主要仕様				依託先
		規模[kW]	蓄電池	太陽電池	用途、その他	
1979	Losquest Islond	350	1500Ah (15日分)	Si	無線用　10kVA,ﾊﾞｯｸｱｯﾌﾟ電源アリ 風力 1.1kW	ＣＮＥＴ
1988	Mont Bauquest	50	800Ah	Si	TV.FMの中継用 系統連系 IV:60kVA	ﾌﾗﾝｽ政府. 仏TV
	Nice Airport	50	800Ah	Si	飛行場照明 系統連系 IV:60kVA	ﾌﾗﾝｽ政府. 仏TV
	Aghia Roumeli	50	800Ah	Si	村落電化	ﾌﾗﾝｽ政府. グリク社
	Rondulime, Corsica	42	3000Ah	Si	ｺﾙｼｶ島村落用　ﾁｨｰｲｾﾞﾙと併用 IV:50kVA	ｿｰﾏﾗｼﾞｵ,ﾌﾗﾝｽ電光 オルタハム電池
	Kaw	35		Si	村落電化	フランス政府
	Pelloworm Islond	300	8000Ah	Si	リクリエーショウセンタ用電源 系統連系 IV:75kVA 3台	ドイツ政府
	Kythnos Islond	100	2400Ah	Siｼｨﾒﾝｽ	島の電源 独立システム IV:50kVA 3台	ドイツ政府　PPC他
	Fort Islond	50	600Ah	Si	農場のバター製造用 系統連系 IV:30kVA	ドイツ政府,Irish他
	Chevetogne	63	275kWh	Si	プールのポンプ及び照明用 系統連系 IV:30kVA	ベルギー政府
	Hobohen	30	水素と水	Si	電気分解用(Electrolyris)　ＦＮＩ	ベルギー政府
	Holland	48	500Ah	Si	学校 系統連系 IV:60kVA	オランダ政府
	Terachelling Islond(ﾆｭｰｼﾞﾗﾝﾄﾞ)	50		Si	海員学校用(Marine school)Holec	オランダと ドイツ政府
	Varta Islond	60	1500Ah	Si	村落電化 ﾁﾞｨｰｾﾞﾙと併用 IV:80kVA	インド洋(ｵﾗﾝﾀﾞ)
	Tremiti Islond	65	2250Ah	Si	海水の淡水化 独立電源 (sea water desalivation)	イタリア政府

Giglio Islond	45	64kWh	Si	水の消毒用と氷店(water disinfection) 系統連系 IV:4kVA,12kVA	イタリア政府
Alicudi Islond	80	500-600kWh	Si	村落電化 ﾃﾞｨｰｾﾞﾙと併用 ＥＮＥＬ IV:40kVA	イタリア電力会社
Marchwood	80	370Ah	Si	案内板電源 ＢＰ Solar社 IV:40kVA	ＵＫ政府(ｲﾀﾘｱ)
Pakistan	57.2	多結晶	Si	村落電化	パキスタン政府
Pakistan	38.4	多結晶	Si	村落電化	パキスタン政府
Switzerland	100	多結晶	Si	系統連系	スイス政府

参考文献

(1) 浜川、他：８０年代太陽光発電の開発　日刊工業社 Vol.4 1981

(2) 浜川、他：太陽光発電の現状と将来　電気学会誌 102 1984

(3) 平林、横山、秋山、掘米：我が国の太陽光発電システムの開発　電気学会新・省エネルギー研資 ESC-84-7 1984

(4) 太陽エネルギー技術のＲ＆Ｄと展望　ＯＨＭ　Vol.1 1985 p17-28

(5) 堀米、他：小特集:自然エネルギー利用技術の開発動向 電気学会誌 105 1985

(6) 電気学会太陽電池調査専門委員会編：太陽電池ハンドブック コロナ社 1985

(7) 石田、横江、神本：ここまで来た太陽光発電（米国編） 電力新報社 1981

(8) 栗井知比古：米国の風力、太陽電池、燃料電池　エネルギーレビュー Vol.12 1985 p18-21

(9) 高橋、浜川、後川編：太陽光発電　森北出版　1980

(10) 山田実：太陽光発電システムの技術　ＥＬＡＮ　1988 p10-14

(11) 地熱発電・太陽光発電の動向　ＯＨＭ　Vol.5 1990 p86-88

謝　辞

本論文をまとめるにあたり、終始御親切な御指導とご鞭撻を賜わった大阪大学基礎工学部電気工学科　濱川圭弘教授に衷心より感謝の意を表し、御礼申し上げます。

また、本論文の作成に当たり、御懇篤なる御審査と御教示をいただいた、大阪大学基礎工学部電気工学科　蒲生健次教授、奥山雅則教授、小林哲郎教授に厚く御礼申し上げます。

本研究遂行にあたり御指導と御鞭撻を賜わり、また本論文の作成の機会を与えていただいた、横浜国立大学電子情報工学科池田吉堯教授（現神奈川工科大学電気工学科教授）に心から御礼申し上げます。

本研究の遂行および論文作成に当たり、種々の御教示と御協力をいただいた、横浜国立大学電子情報工学科鳳紘一郎教授、大学院博士過程前期生岩堀道雄氏（現、富士電機総合研究所）に厚く御礼申し上げます。

研究業績目録

１・本論に関する発表論文

論文名	著者	発表誌
第２章		
○自然環境エネルギー発電システムに関する研究	逸見、岩堀 山形、池田	電気学会論文誌 Vol.107-B, No.8, pp.404-411(1987)
○太陽電池の出力特性に関する研究	逸見	日本太陽エネルギー学会論文誌 Vol.18, No.1 pp.13-20 (1992)
第３章		
○Study on the Output Power Degradation of Solar Battery.	J.Itsumi	Proceedings of INRE Conf.CHINA'90 Beijing, E-13, pp.533-539 (1990)
○アモルファス太陽電池の長期劣化抑制法に関する考察	逸見	日本太陽エネルギー学会論文誌 投稿中 (1993)
○Consideration on Control Method Against the Long Period Deterioration of the Amorphous Solar Cell	J.Itsumi	ISES Solar World Congress '93 Budapest,Hungary (1993)
第４章		
○自然環境エネルギー発電システムに関する研究	逸見、岩堀 山形、池田	電気学会論文誌 Vol.107-B, No.8, pp.404-411(1987)
第５章		
○自然環境エネルギー発電システムに関する研究	逸見、岩堀 山形、池田	電気学会論文誌 Vol.107-B, No.8, pp.404-411(1987)
○ＰＷＭインバータの短絡電流抑制と損失評価	逸見、船渡 池田	電気学会論文誌Vol.111-D, No.9 pp.741-750 (1991)
○ＰＷＭインバータ用半導体電力変換器の電力損失評価と電流定格決定法に関する考察	池田、逸見	中国電力電子学会技術学会論文（上海）Vol.86-3 pp.1-15 (1986)
○The Power Loss of the PWM Voltage-Fed Inverters.	Y.Ikeda, J.Itsumi H.Funato	ES Conf.19'JapanⅡ-C-5, pp.277-283(1988)

２．論文リスト

Ａ．国内

(1) 上柳仲三、逸見次郎、松田靖夫、池田吉堯、“TRIACを用いた周波数直接変換装置”電気学会論文誌 Vol.96-B, No.2, pp.59-66(1976)

(2) C.Kamiyanagi,J.Itsumi,Y.Matuda,Y.Ikeda“Direct Frequency Conveter Using Triac's.” Vol.96, No.1, pp.72-80 (1977)

(3) 逸見次郎、岩堀道雄、山形裕、池田吉堯”自然環境エネルギー発電システムに関する研究”電気学会論文誌 Vol.107-B, No.8, pp.404-411(1987)

(4) 池田吉堯、逸見次郎、羽路伸夫、“低温度差半導体熱電変換システムに関する考察” 電気学会論文誌 Vol.110-C, No.1 pp.29-35(1990)

(5) Y.Ikeda,J.Itsumi and N.Haneji“Semiconductor Temrmoelectric-Energy Comversion Systems Working at Low Temperature Differences.” Electrical Engineering in Japan Vol.111, No.4 pp.99-107(1991)

(6) 逸見次郎、船渡寛人、池田吉堯 “ＰＷＭインバータの短絡電流抑制と損失評価” 電気学会論文誌 Vol.111-D, No.9 pp.741-750 (1991)

(7) 逸見次郎、“太陽電池の出力特性に関する研究”日本太陽エネルギー学会論文誌 Vol.18, No.1 pp.13-20 (1992)

(8) 鳳宏一朗、洪朝富、東郷光洋、逸見次郎 “Ａ１薄膜配線の交流および直流抵抗変化とエレクトロマイグレーション”日本表面科学会論文誌 JSSJ-5 Vol.12 No.5 PP.25-31 (1992)

(9) 逸見次郎 “アモルファス太陽電池の長期劣化抑制法に関する考察 日本太陽エネルギー学会論文誌投稿中 (1993)

Ｂ．海外

(1) 池田吉堯、逸見次郎 “ＰＷＭインバータ用半導体電力変換器の電力損失評価と電流定格決定法に関する考察”中国電力電子学会技術学会論文（上海） Vol.86-3 pp.1-15 (1986)

(2) Y.Ikeda,J.Itsumi,and H.Funato “The Power Loss of the PWM Voltage-Fed Inverters.” Electronics Specialists Conference and the 19 Japan II-C-5, pp.277-283(1988)

(3) Y.Ikeda,M.Ubukata and J.Itsumi "Magin in the Jnction Temperature Rise of Semiconductor Valve Assemblise Caused by the Standard Load-Duties for Test for Motor Drive Systems." 3rd Europe Confernce on Power Electronics and Applications, Aachen'89 LS.16-2, pp.445-450 (1989)

(4) J.Itsumi "Study on the Output Power Degradation of Solar Battery" Proceedings of International Confernce on Newand and Renewable Energy, Beijing,CHINA'90, E-13, pp.533-539 (1990)

(5) J.Itsumi " Consideration on Control Method Against the Long Period Deterioration of the Amorphous Solar Cell" :ISES Solar World Con.'93 Budapest, Hungary (1993)

C．研究会・学会発表・技術報告

(1) 池田吉堯、上柳仲三、逸見次郎：ﾄﾗｲｱｯｸによる1/3周波数逓降に関する一研究 昭和４３年電気学会東京支部大会 Vol.211

(2) 上柳仲三、古賀猛、逸見次郎、池田吉堯:ﾄﾗｲｱｯｸを用いた周波数２逓倍器の一研究 昭和４５年電気四学会連大 Vol.618

(3) 上柳仲三、逸見次郎、池田吉堯:２方向３端子ｻｲﾘｽﾀの反転動特性" 昭和４５年電気学会東京支部大会 Vol.170

(4) 池田吉堯、上柳仲三、逸見次郎" 直流電動機のﾁｮｯﾊﾟ制御に関する研究" 昭和４６年電気学会全国大会 Vol.636

(5) 池田吉堯、上柳仲三、逸見次郎 "ﾄﾗｲｱｯｸを用いた周波数３逓倍装置に関する研究" 昭和４６年電気学会東京支部大会 Vol.138

(7) 上柳仲三、逸見次郎、池田吉堯"ﾄﾗｲｱｯｸを用いた３相入力－単相３逓倍変換に関する研究" 昭和５０年電気学会全国大会 Vol.709

(8) 佐藤龍二、菅原昌敬、逸見次郎" 縦磁界下における超伝導薄膜に見られる巨視的量子効果" 昭和５１年電気学会全国大会 Vol.375

(9) 菅原昌敬、逸見次郎、吉野輝夫" 超伝導－常伝導多層接合によるＶ－Ｉ特性" 昭和５２年電気学会全国大会 Vol.455

(10) 佐藤龍二、菅原昌敬、逸見次郎" 超伝導薄膜Ｖ－Ｉ特性に見られるﾋｽﾃﾘｼｽ現象" 昭和５２年電気学会全国大会 Vol.446

(11) M·Sugahara,T.Yosihno and J.Itsumi" Current-Voltage Chracteristics of Super Normal Multi-layers." SolidState Devices Confernce the 9th, Vol.B-7-2 (1977)

(12) 逸見次郎、岩堀道雄、高橋徹、池田吉堯 "太陽光発電システム開発に関する諸考察" 半導体電力変換研究会 SPC-82-48, pp1-10 (1982)

(13) 池田吉堯、逸見次郎" 太陽光発電システム用電力変換装置" 昭和５６年電気学会全国大会 Vol.491

(14) 池田吉堯、逸見次郎、平敷安洋" 太陽光発電システム用電力変換装置の研究" 昭和５７年電気学会全国大会 Vol.491

(15) 逸見次郎、岩堀道雄、高橋徹、古川誠一、池田吉堯 "太陽光発電用変換装置とその制御に関する研究" 半導体電力変換研究会 SPC-84-23, pp.39-49 (198

(16) 岩堀道雄、逸見次郎、高橋徹、池田吉堯" 太陽光発電用変換装置と配電系統との連系に関する研究" 昭和５８年電気学会全国大会 Vol.1091

(17) 逸見次郎、高橋徹、古川誠一、池田吉堯" 太陽光・風力発電併用ｼｽﾃﾑ に関する研究" 昭和６０年電気学会全国大会 Vol.1187

(18) 池田吉堯、逸見次郎" 電力用半導体素子の特性改善の動向" 昭和６０年電気学会全国大会シンポジウム Vol.S-7-1

(19) 関沢俊彦、逸見次郎、入口毅、池田吉堯 "ＰＷＭ制御における電力用半導体素子の損失評価（Ｉ）半導体電力変換研究会 SPC-85-59, pp.1-11 (1985)

(20) 関沢俊彦、逸見次郎、入口毅、池田吉堯" 電力用半導体素子の損失評価法" 昭和６０年電気学会全国大会 Vol.465

(21) 古川誠一、逸見次郎、山形裕、池田吉堯" 太陽光・風力発電併用ｼｽﾃﾑ に関する研究" 昭和６１年電気学会全国大会 Vol.1174

(22) 山形裕、瀬賀利明、逸見次郎、羽路伸夫、池田吉堯" 電力用半導体素子の故障予知に関する研究" 昭和６２年電気学会全国大会Vol.428

(23) 塚田達也、生方正志、逸見次郎、羽路伸夫、池田吉堯" 熱電変換素子の低温度差における特性" 昭和６２年電気学会全国大会 Vol.1220

(24) 塚田達也、新井満、逸見次郎、羽路伸夫、池田吉堯" 太陽電池駆動による低温度差半導体熱電冷却" 昭和６２年電気学会全国大会 Vol.1381

(25) 池田吉堯、逸見次郎、的矢光晴、船渡寛人 "ＰＷＭ制御における電力用半導体素子の損失評価（Ⅱ）半導体電力変換研究会 SPC-87-8, pp67-77 (1987)

(26) 船渡寛人、逸見次郎、藤倉辰男、小野田浩、池田吉堯" 電圧型ＰＷＭｲﾝﾊﾞｰﾀに用いるﾊﾟﾜMOSFETの動特性の考察" 昭和６３年電気学会全国大会 Vol.487

(27) 太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ調査委員会 ”太陽エネルギー利用システムの現状と将来”電気学会技術報告 261 (1988)

(28) 逸見次郎”太陽電池の出力特性を短時間に評価する測定法に関する考察”日本太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ学会 日本風力ｴﾈﾙｷﾞｰ協会 Vol.6, pp.21-24 (1988)

(29) 逸見次郎、船渡寛人、宗石圭一、村本浩一、池田吉堯”ﾊﾞｲﾎﾟｰﾗ･ﾊﾟﾜﾄﾗﾝ ｼﾞｽﾀを用いたｲﾝﾊﾞｰﾀの短絡防止法に関する考察”半導体電力変換研究会 SPC-89-32 pp.19-27 (1989)

(30) 安田陽、逸見次郎、池田吉堯”共振形ＤＣ－ＤＣコンバータにおけるｷｬﾊﾟｼﾀﾝｽとﾘﾌﾟﾙ率の関係”平成元年産業応用部門全国大会 Vol.133, pp.567-572

(31) エネルギー貯蔵システムに関する調査研究プロジェクト”エネルギー貯蔵システムに関するヨーロッパ調査報告書”エネルギー・資源学会 (1989)

(32) 逸見次郎、安田陽 ”太陽電池の経年変化に関する一考察”日本太陽ｴﾈﾙｷｰ学会 日本風力ｴﾈﾙｷﾞｰ協会合同研究会 Vol.11, pp.41-44 (1990)

(33) 逸見次郎、安田陽 ”太陽電池の出力特性に関する一考察”第７回ｴﾈﾙｷﾞｰｼｽﾃﾑ・経済ｺﾝﾌｧﾚﾝｽ Vol.6-1, pp229-234 (1990)

(34) 逸見次郎”アモルファス太陽電池の特性改善に関する考察(Ｉ)” 日本太陽ｴﾈﾙｷﾞｰ学会 日本風力ｴﾈﾙｷﾞｰ協会合同研究会 Vol.3, pp.37-40 (1991)

(35) 逸見次郎、安田陽”アモルファス太陽電池の特性劣化”電気学会全国大会 Vol.1535 (1991)

(36) 逸見次郎 “アモルファス太陽電池出力特性” エネルギー・資源学会第１１回研究会 Vol.1-2 (1992)

(37) 逸見次郎 “アモルファス太陽電池の劣化抑制に関する考察”第３回高効率太陽電池ワークショップ C7 (1992)

(38) 逸見次郎 “太陽電池の長期劣化抑制法”日本太陽ｴﾈﾙｷｰ学会 日本風力ｴﾈﾙｷﾞｰ協会合同研究会 Vol.13 (1992)

(39) 逸見次郎 “アモルファス太陽電池の光劣化と回復効果”電気学会全国大会 Vol.1681 (1993)