

# 太陽光発電システムの出力改善及び安全性向上に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2021-05-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 李, 暁楊 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10291/21809">http://hdl.handle.net/10291/21809</a>

明治大学大学院理工学研究科

2020年度

博士学位請求論文

太陽光発電システムの出力改善及び  
安全性向上に関する研究

A Study on the Improvement of Photovoltaic System's  
Output Power and Facility Safety

学位請求者 電気工学専攻

李 曉楊

# 目次

第1章 序論 .....	6
第2章 背景 .....	9
2.1 太陽光発電の原理 .....	10
2.2 太陽光発電システムの分類 .....	12
2.2.1 系統連系システム .....	12
2.2.2 独立型システム .....	12
2.3 太陽光発電システム各部分の紹介 .....	13
2.3.1 太陽電池アレイ回路 .....	15
2.3.2 パワーコンディショナ .....	16
2.3.2.1 昇圧回路と降圧回路 .....	16
2.3.2.2 最大電力点の追従機能 .....	17
2.3.2.3 SPWM 技術を用いる DC-AC インバータ .....	17
2.3.2.4 制御機構及び保護装置 .....	18
2.3.3 接続箱・分電盤等 .....	18
2.4 太陽光発電システムの出力を左右する要因 .....	19
2.4.1 地球が受ける光エネルギー・大気を通る距離と設置場所の緯度 .....	19
2.4.2 雲の影響 .....	20
2.4.3 太陽電池アレイ周辺の障害物の陰 .....	20
2.4.4 様々な陰が放射照度へ与える影響の実測と分析 .....	20
2.5 太陽光発電システムの保安性 .....	25
2.5.1 太陽光発電システムの事故例 .....	25
2.5.1.1 火災事例 .....	25
2.5.1.2 感電事例 .....	27
2.5.2 事故例よりの考え .....	28
2.6 太陽光発電システムに関する従来の研究 .....	29
2.6.1 出力改善のためのソフトウェア的な研究 .....	29
2.6.2 安全性向上の研究 .....	30
第3章 目的 .....	31
第4章 出力改善に関する研究 .....	34
4.1 太陽電池アレイ回路の分断化 .....	35
4.1.1 分断化太陽電池アレイ回路の出力特性 .....	35
4.1.1.1 部分陰影響の仕組み .....	35
4.1.1.2 アレイ回路の分断化 .....	37

4.1.1.3	分断化する手法	39
4.1.2	分断化太陽電池アレイ回路の出力特性	41
4.1.2.1	部分陰がない場合の出力特性	41
4.1.2.2	部分陰がある場合の出力特性	44
4.1.3	ブリッジ電流	51
4.1.3.1	ブリッジ電流の機構	52
4.1.3.2	ブリッジ電流の様子	54
4.1.4	分断化手法の実験検証	55
4.1.4.1	実験条件及び用具	55
4.1.4.2	分断化なしの回路及び特性	56
4.1.4.3	二分の一分断法（循環ループなし）の回路及び特性	57
4.1.4.4	二分の一分断法（循環ループあり）の回路及び特性	58
4.1.4.5	実験データの比較検討	59
4.1.5	各分断手法のコスト	59
4.1.6	信頼度評価	60
4.1.7	分断化手法の結論	62
4.2	MPPT 付定電圧制御昇圧回路	63
4.2.1	開ループ昇圧回路から閉ループへ	63
4.2.2	MPPT アルゴリズムの導入	65
4.2.3	一枚太陽電池モジュールから太陽電池アレイ回路へ	65
4.2.4	MPPT 付定電圧制御昇圧回路に対するシミュレーション	67
4.2.4.1	シミュレーション用ソフトウェア	67
4.2.4.2	シミュレーション条件	67
4.2.4.3	MPPT 付定電圧制御昇圧回路	67
4.2.4.4	P&O 法付従来の昇圧回路	68
4.2.4.5	INC 法付従来の昇圧回路	72
4.2.4.6	P&O 法付定電圧制御昇圧回路	76
4.2.4.7	INC 法付定電圧制御昇圧回路	79
4.2.4.8	部分陰における太陽電池アレイ回路の電力損失	83
4.3	部分陰位置判定法	85
4.3.1	この機能の必要性	85
4.3.2	判定法の提案	85
4.3.3	簡易計算判定法の提案	85
4.3.3.1	一位陰の位置判定	85
4.3.3.2	二位陰の場合のブリッジ電流についての分析	89
4.3.3.3	二位陰の位置判定	95

4.3.3.4	零・一・二位陰の総合位置判定	97
4.3.4	安定している放射照度での部分陰位置判定	100
4.3.4.1	ランダム一位陰	100
4.3.4.2	ランダム二位陰	102
4.3.4.3	ランダム零・一・二位陰	105
4.4	技術の一般化に関する検討	107
第5章	安全性向上に関する研究	108
5.1	太陽光発電システムの安全性向上の必要性	109
5.2	提案手法	110
5.2.1	提案回路の構成	110
5.2.2	遮断装置の電力転送効率と自己消費	112
5.2.3	制御信号周波数の選択	114
5.2.4	受信側の制御信号処理	114
5.2.4.1	フィルターの選択とその特性	115
5.2.4.2	受動バンドパスフィルターの設計	116
5.2.4.3	能動バンドパスフィルターの設計	119
5.2.4.4	能動バンドパスフィルターの選択	121
5.2.5	遮断装置の直列運転と制御信号転送回路	122
5.2.6	遮断装置の電源供給	123
5.2.6.1	開発初期の電源回路	124
5.2.6.2	リニア仮想接地電源	124
5.2.6.3	PWM 仮想接地電源	125
5.3	シミュレーションでの検証	127
5.3.1	遮断装置の投入動作	127
5.3.2	バンドパスフィルターについてのシミュレーション	128
5.3.3	動作可能な制御信号電圧の下限	129
5.3.4	遮断装置の直列運転	130
5.4	実機検証の結果	131
5.4.1	フィルターに対する周波数応答特性の実験検証	131
5.4.2	動作可能な制御信号電圧の下限	134
5.4.3	遮断装置の開閉速度	137
5.4.4	遮断装置の電源電圧に対する適応性	136
5.4.5	遮断装置の直列運転	139
第6章	結論と今後の課題	142
6.1	出力改善に関する検討の結論と今後の課題	143
6.2	安全性向上に関する検討の結論と今後の課題	145

付録第 1 章 太陽光発電システム各部分の特性 .....	147
F1.1 太陽電池.....	149
F1.1.1 太陽電池と発電原理.....	149
F1.1.2 太陽電池の種類.....	150
F1.1.2.1 シリコン系.....	150
F1.1.2.2 化合物系.....	154
F1.1.2.3 有機系.....	155
F1.1.2.4 ペロブスカイト系.....	155
F1.1.2.5 量子ドット系.....	156
F1.2 シリコン系太陽電池セルの数値モデル.....	157
F1.2.1 数値モデル.....	157
F1.2.2 太陽電池モデルの組み合わせ.....	158
F1.3 太陽電池アレイ回路とその出力特性.....	161
F1.3.1 太陽電池アレイ回路の構成.....	161
F1.3.2 陰がない場合の出力特性.....	162
F1.3.2.1 モジュール一枚の特性.....	163
F1.3.2.2 太陽電池アレイ回路の特性.....	165
F1.3.3 陰がある場合の出力特性.....	168
F1.3.4 多峰性の原因.....	172
F1.4 DC-DC コンバーター回路とその数値モデル.....	174
F1.4.1 昇圧チョッパ回路.....	174
F1.4.1 降圧チョッパ回路.....	177
付録第 2 章 数値シミュレーションの精度向上に対する検討.....	180
F2.1 実際の天気データを用いるシミュレーション及び 太陽電池モジュールの表面温度の計算法.....	181
F2.1.1 気象データの利用法.....	181
F2.1.1.1 太陽電池モジュール表面温度の影響を無視する シミュレーション.....	182
F2.1.1.2 太陽電池モジュール表面温度の計算.....	184
F2.1.1.3 太陽電池モジュール表面温度計算ありのシミュレーション.....	185
F2.2 気象データを用いる日発電量の統計.....	188
F2.2.1 シミュレーションによる日発電量の統計.....	188
F2.2.2 部分陰の影響ありの日発電量統計及び部分陰の位置判定.....	199
F2.3 室内実験用光源の自作.....	202
F2.3.1 光の基礎知識.....	202
F2.3.2 LED 電球の仕様と特性.....	203

F2.3.3	LED 電球のアレイと平均照度の計算法 .....	207
F2.3.4	LED 電球を用いる光源の製作 .....	209
F2.3.5	自作した光源での実験結果 .....	210
F2.3.6	部分陰の作り方 .....	213
付録第 3 章	放射照度の低下とブリッジ電流 .....	215
F3.1	陰を生じるもの .....	216
F3.1.1	背が高い障害物の陰 .....	216
F3.1.2	太陽電池モジュールに付着する物での陰 .....	216
F3.2	異なる透過率とブリッジ電流 .....	217
F3.2.1	分断化なし太陽電池アレイ回路 .....	218
F3.2.2	二分の一分断法（循環ループあり）の太陽電池アレイ回路 .....	221
F3.2.3	結論 .....	224
参考文献	.....	225
謝辞	.....	230

# 第 1 章

## 序論

太陽光発電は再生可能エネルギーの一種である。環境に優しく、発電する際にCO<sub>2</sub>が排出しない等の特徴があると言われる。

1997年に開かれたCOP3(国連気候変動枠組条約第3回締約国会議)において採択された京都議定書において、先進国が排出する温室効果ガスの具体的な削減目標が示された。その後、多くの先進国が化石燃料の使用を減らす事や再生可能エネルギーをより多く導入する事により目標の達成を目指した。2015年12月に開かれたCOP21においては京都議定書の終了期限後に有効となるパリ協定が採択された。この協定で先進国に加え発展途上国を含めた世界共通目標を設定する決議を行った。ところが、2017年にトランプ氏のアメリカ大統領当選により、アメリカがパリ協定から退く意向が表れ、2019年11月に正式に離脱手続きを始めた。2017年のCOP23以後その影響を含め、諸国が技術的な論議を行い、「脱炭素社会」へ協力して向かうことを決議したが、重要なCO<sub>2</sub>排出取引権等についての決議を結ぶ目処がまだ立たないのが現実である。諸国は政治的な思惑から「脱炭素社会」の推進を表明し、アメリカを除き、独自の取り組みを進めている。2020年アメリカ大統領選挙で当選したバイデン氏はパリ協定に再加入する意向を表明した。今後4年間の行方を注目すべきである。

諸取組の中で、「太陽光発電システム」の大量設置は「脱炭素社会」を構成する重要な一環であると注目されている。特に2018年から市販太陽電池モジュールの生産コストがさらに安価になっている一方、発電効率が逆に20%を突破したことで、現在の太陽光発電所は固定価格買取制度(FIT[Feed-In-Tariff]制度)をしなくても経営できると言われる。例えば2020年に中国四川省は太陽光発電買取価格が火力発電と同じレベルの0.4人民元(約6日本円)/[kWh]を超えないような政策を推進している[1-1]。これは太陽光発電がすでに火力発電と同じレベルの競争力を有することを意味している。

一般的に太陽光発電システムのメイン部品は太陽電池モジュールである。システムの規模によって、モジュールの枚数次第で一枚のみの小規模から何百万枚の超大規模システムまで自由に構成できる。投資と運営面について、基本的に中規模以上の太陽光発電所は発電関連会社によって運営される事が多く、全量売電するものも多い。逆に中小規模の太陽光発電システムは一般民衆が投資する事が多く、その多くは自家用あるいは応急電源として利用される。パリ協定の発効後、「脱炭素社会」を構成するために、太陽電池モジュール・小型風力発電機・蓄電池等を付加したLED街灯などの省エネインフラの整備が年々増加している。さらに、太陽光発電用部品の値段が下がりつつある現在、少額の投資で何十年間の電気料金を節約することは一般民衆にとっても利益になる。

一方、太陽光発電システムは天気・時間・経年劣化・汚れやゴミ・その設置場所周辺の状況（陰の状況）等の影響を受け、常に最大出力で発電できないとよく言われている。上述の天気・時間と経年劣化による影響は不可避免的に発生する。経年劣化は定期点検で早期発見する必要がある。汚れやゴミは溜る場合に定期的に清掃すればいい。唯一技術的な手段で解決すべきものは陰の影響、いわゆる「部分陰問題」である。本論文の出力改善とは部分陰問題を検討し、解決手法を提案することである。太陽電池アレイ回路分断化及びその分断化のトポロジー最適化を提案して、部分陰の影響を軽減し、できるだけ多くの電力を出力できるようにすることである。

現在まで太陽光発電システムは規模を問わずに大量に設置されていた。一般的に太陽光発電システムは頑丈であるが、安全かつ長期的に利用できるように、発電システムの保安性を重要視すべきである。例えばシステムに対する常時監視・定期的な点検や清掃・故障診断および万が一の事故が発生する際の応急処置手順などを事前に用意・整備しなければいけない。今までに公表された複数の事故例により、太陽光発電システムは他の災害に巻き込まれて二次災害が発生するパターンが多かったことが判明しているので、どうすればその二次災害を防ぐことができるのかが重要な検討事項であると考えられる。

本論文のテーマは「太陽光発電システムの出力改善及び安全性向上に関する研究」である。出力改善と安全性向上を個別に検討する。

## 第 2 章

### 背景

## 2.1 太陽光発電の原理

太陽光発電の中核は太陽電池である。太陽電池の発電原理は光起電力効果で、光のエネルギーを即時に電気エネルギーに変換して出力するのは太陽電池の機構である。

一枚の太陽電池がセルと呼ばれており、太陽電池の最小単位である。



Fig.2-1 太陽電池セル

Fig.2-1 は太陽電池セルである。表面の青色の縞模様は半導体材料で構成された pn 接合である。一本の帯は一つの pn 接合である。銀色の導電金属で複数の pn 接合を並列接続してセルを組み立てる。並列であるから、セルの出力電圧=pn 接合の出力電圧で、その電圧は低い。実物の太陽電池セルは薄く、ガラスのように割れやすいものであり、単体では非常に使いにくい。通常使用する時は複数枚を直列接続してパネル状の製品にするが、これはソーラーパネルあるいはソーラーモジュールと呼ばれる。そして、複数枚のモジュールを直並列接続して、ソーラーアレイを構成する。以下、本論文ではソーラーモジュールを太陽電池モジュール、ソーラーアレイを太陽電池アレイ回路と呼ぶ。これらを Fig.2-2 に示す。

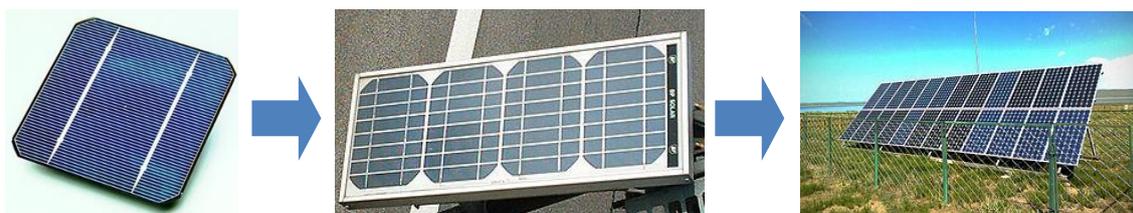


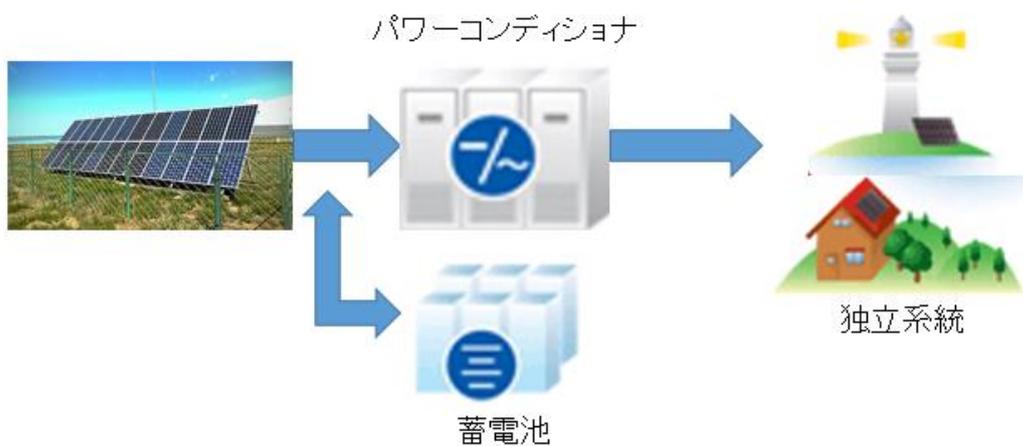
Fig.2-2 太陽電池アレイの構成

太陽電池アレイ回路の出力は直流であり，商用電力の交流系統と接続するために，両者の間に直流を交流に変換する装置が必要である。Fig.2-3 に示されるように，このためにパワーコンディショナを用いる。

なお，売電の有無によって全量自家用（売電しない）・余剰売電（余った電力を売電）と全量売電の区別がある。詳細は次節に述べる。



全量売電あるいは余剰売電



独立系統

Fig.2-3 太陽光発電システム

## 2.2 太陽光発電システムの分類

太陽光発電システムは大きな商用系統と連系する系統連系システムと独立型システムに分類される[2-1]。

系統連系システムについては、連系する商用電力の電圧によって、低圧連系、高圧連系、特別高圧連系に区分される。詳細は Table.2-1 にまとめる。

Table.2-1 太陽光系統連系区分[2-2]

連系区分	低圧連系	高圧連系	特別高圧連系
設備容量	～50 [kW]未満	50～2 [MW]未満	2 [MW]以上
電圧区分	600 [V]以下	600～7000 [V]以下	7000 [V]超
公称電圧	100 [V],100/200 [V] 415 [V],240/415 [V]	3300 [V] 6600 [V]	11000 [V],22000 [V] 33000[V],66000 [V]
受電設備	低圧配電線 柱上変圧器で降圧して配電 100/200 [V]	高圧配電線 配電用変電所から柱上変圧器まで 6600 [V]	送電線 2次変電所から送電線まで 33000 [V]/66000 [V]
需要家	住宅・商店	小規模工場・ビル	大規模工場
太陽光発電の連系契約	低圧連系 単相 3 線・三相 3 線	高圧連系 三相 3 線	特別高圧連系 三相 3 線・中性点接地

独立型システムについては、蓄電池併用型と蓄電池なしのシステム、さらに風力発電と併用するなどのハイブリッド型システムに分類される。

以下では代表的なシステムの形態を説明する。

### 2.2.1 系統連系システム

系統連系システムは以下の三種類に区分できる。

全量自家用システム：工場など施設内の電力需要が常に太陽光発電システムの定格出力より大きく、逆潮流を生じる可能性がない場合に採用されるシステム。

余剰売電システム：負荷より太陽光発電システムの定格出力電力のほうが大きいと、自家用の部分を除き余剰電力が生じる。その場合、余剰の部分電力を電力会社に売電するシステム。

全量売電システム：発電した電力を全て電力会社に売電するシステム。

### 2.2.2 独立型システム

商用電力系統と連系しないシステムである。山間部や離島などでよく使用されていたが、防災用の街路灯、防災無線でも採用されている。同時に、蓄電池があるか否か・風力発電装置等と併設するか否かの区分もある。

## 2.3 太陽光発電システム各部分の紹介

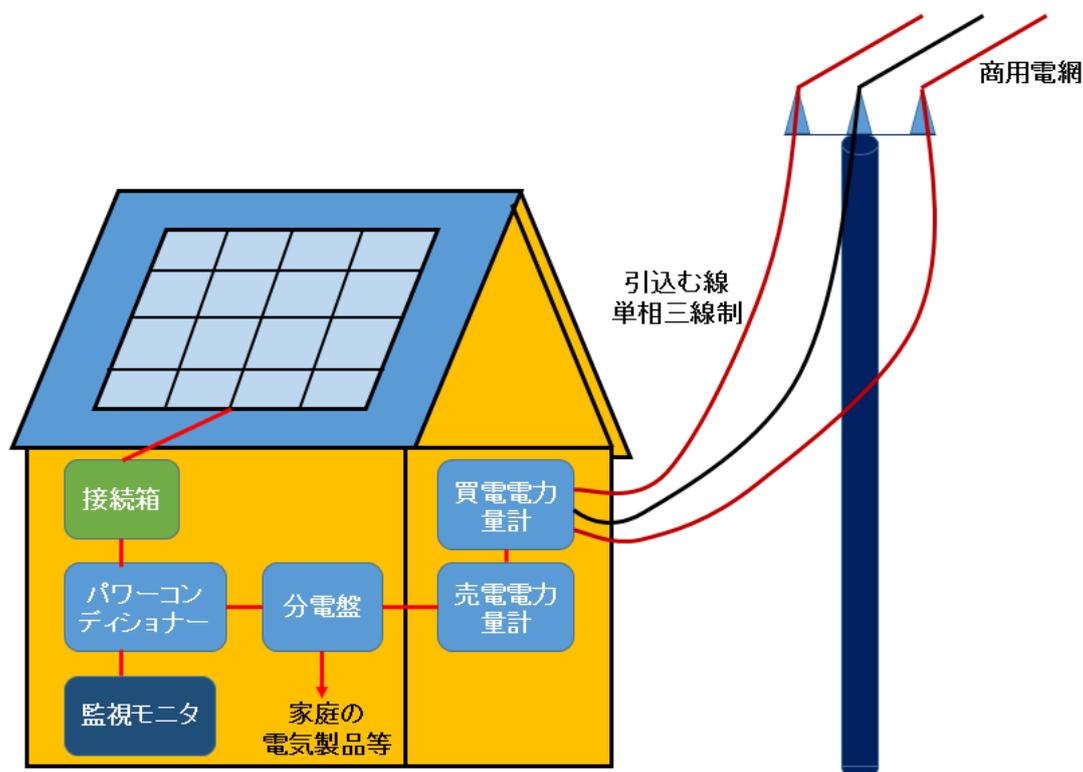


Fig.2-4 住宅用太陽光発電システムの構成[2-3]

Fig.2-4 に示すシステムは低圧連系，余剰売電をする住宅用太陽光発電システムである。屋根の上に設置された太陽電池アレイ回路（複数枚の太陽電池モジュール・モジュールを固定する架台なども含む）・屋内外に取り付けたパワーコンディショナ（インバータ・系統連系保護装置などを含む）・これらを接続する配線及び接続箱・さらに交流側に設置する交流側開閉器・電力量計などで構成される。[2-4]

本論文はこのようなシステムを研究対象とする。

メガソーラー太陽光発電所の一例を Fig.2-5 に示す。この発電所の事業概要は Table.2-2 にまとめる。構造的に住宅用太陽光発電システムとほぼ同じである。相違点は太陽電池モジュールの枚数・パワーコンディショナの出力容量及び接続箱や保護装置の規模である。図面上で目立つのは地面に設置された大量の太陽電池モジュールである。それらを配電線で集電してパワーコンディショナに直流電力を集め，交流に変換・変電してから電力系統に売電する。当然に発電所の規模が大きいため，防犯や防災の整備が不可欠である。なお，地域連携のために，見学施設や緊急時用防災区域も充実している。

Table.2-2 静岡県に実在するメガソーラー発電所の事業概要

設置場所	浜松市北区引佐町別所 9-42 (旧引佐北部中学校跡地)	事業期間	2013.9.10 ～ 2033.8.31
名称	きりやま太陽光発電所 (浜松・いなさ太陽光発電所)	発電設備	モジュール/京セラ製 (多結晶シリコン)
発電能力	1,000 [kW] (1 [MW])		パワーコンディショナ/日新電機製
想定年間 発電量	112 万 [kWh] (一般家庭約 243 世帯分に相当)	モジュール 枚数	4,102 枚
想定年間 CO2 削減量	約 580,000 [kg]-CO2 (0.518 [kg/kWh]で換算)	敷地面積	約 20,484 [㎡]

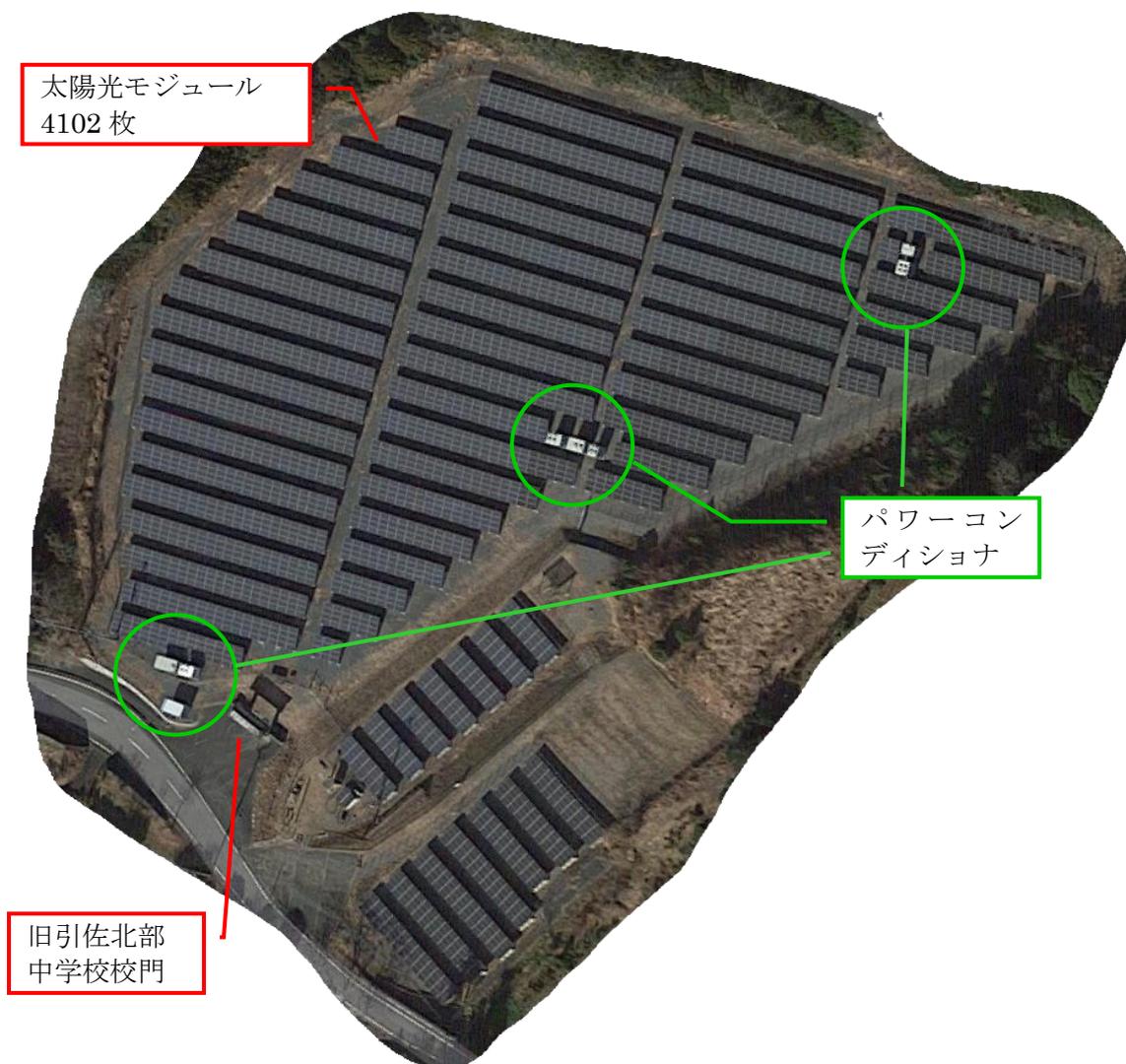


Fig.2-5 静岡県に実在するメガソーラー発電所

### 2.3.1 太陽電池アレイ回路

普通の住宅用太陽光発電システムの規模は住宅の屋根の面積・傾きや方向の客観的な条件により，その規模を 3~5 [kW]にする場合が多い。200 [W]一枚の太陽電池モジュールを用いると，およそ 24 枚でその規模のシステムが構成できる。例として，一本のストリングには 1 列 6 枚のモジュールを直列接続して 4 本のストリングを並列接続すると，太陽電池アレイ回路が構成でき，総出力が 4.8 [kW]である。通常，住宅に引き込む電源電圧は单相 3 線の 200 [V]とする場合が多い。設置される太陽光発電システムを電力系統に接続するために，交流変換装置とするパワーコンディショナの出力電圧も单相 3 線の 200 [V]である。電圧レベルについての詳細を次節で述べる。

なお，太陽電池アレイ回路を設置する敷地が必要になる。試算によれば，このアレイ回路の所要面積はおよそ 30 [m<sup>2</sup>]である。

構成した太陽電池アレイ回路は Fig.2-6 に示される。各パーツの意味を後節で述べる。

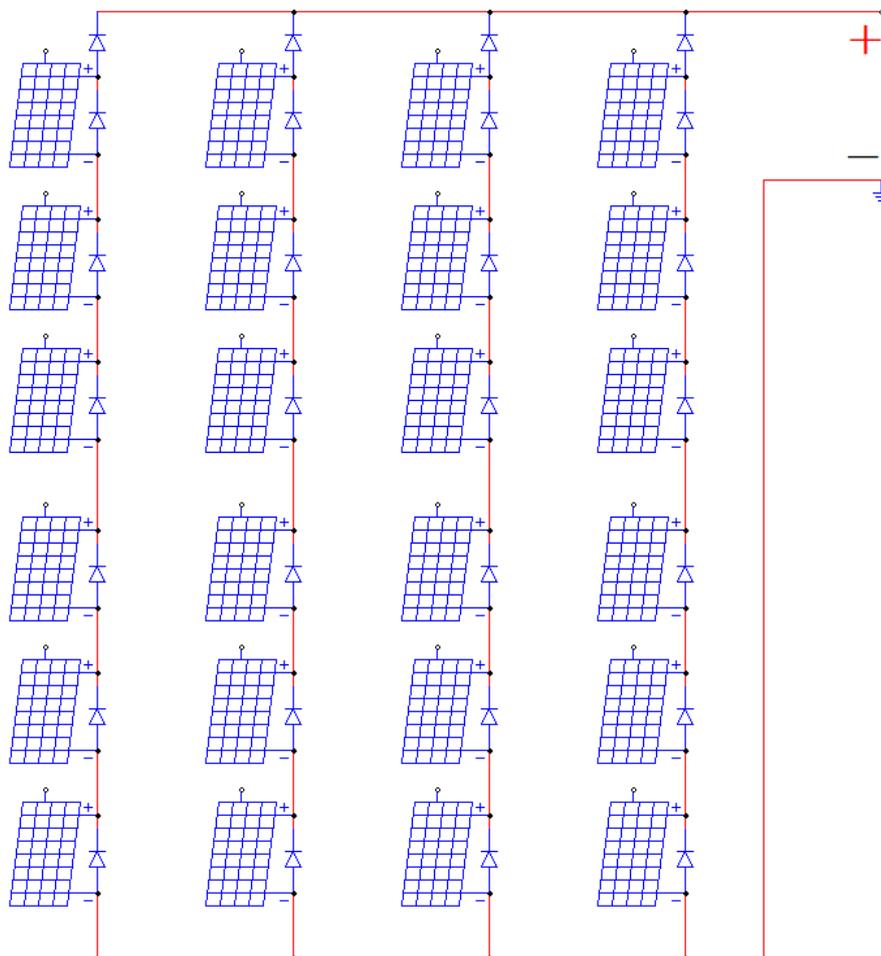


Fig.2-6 太陽電池アレイ回路

### 2.3.2 パワーコンディショナ

パワーコンディショナは電力変換装置である。太陽電池アレイ回路からの直流電力を交流に変換し、電力系統に接続することができる。一般的に太陽光発電用パワーコンディショナには昇圧（降圧）回路・最大電力点の追従機能・SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation)技術を用いる DC-AC インバータ・制御機構及び保護装置がある。

#### 2.3.2.1 昇圧回路と降圧回路

昇圧・降圧回路はパワーコンディショナの重要な一部分である。具体的にどの回路を使うのかは太陽電池アレイ回路の直流電圧とパワーコンディショナの出力電圧レベル次第である。

例えば住宅用システムの場合に、パワーコンディショナ出力の交流電圧は単相 3 線 200 [V]で、その電圧を発生する SPWM インバータに要求する直流母線の電圧は交流電圧の最大値： $200 \times 1.414 = 282.8$  [V]である。しかし、太陽電池アレイ回路の直流電圧は 100~200 [V]に設定され、比較的低いので、この場合昇圧回路が適用される。

メガソーラーの場合には、パワーコンディショナの交流出力電圧は 400~700 [V]の場合が多い。前述の交流電圧の最大値による直流母線に要求するのは約 560~990 [V]である。メガソーラーの太陽電池アレイ回路の直流電圧は 1000 [V]に設定され、比較的高いので、この場合には降圧回路を使用すべきである。

本論文は住宅用太陽光発電システムを研究対象とするので、昇圧回路を利用する。実際の回路は Fig.2-7 に示す。実現する機能は以下のように 3 項目ある：

- アレイ回路から直流電圧を昇圧する。
- 可変負荷に対して太陽電池アレイの運行状態を調整する。
- 太陽電池アレイの最大電力点を追従し、出力を最大化する。

原理的に昇圧回路に入力する PWM 波のデューティー比 (Fig.2-7 の D) で太陽電池アレイの出力電圧を変えるので、アレイの出力電流も同時に変わる。すると、I-V カーブのように最大電力点も追従できる。詳細は後節で述べる。

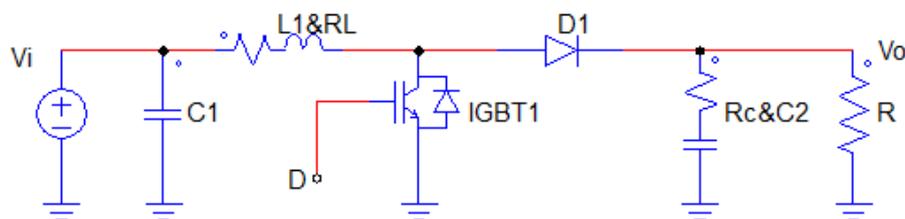


Fig.2-7 昇圧回路

### 2.3.2.2 最大電力点の追従機能

最大電力点追従 (Maximum Power Point Tracking, 以下に MPPT と略称する) は昇圧回路の可変負荷機能を利用し, 適当な太陽電池アレイの電圧と電流の組み合わせを探すことである。

よく使われている方法は山登り法 (Perturb and Observe Method, 以下略称 P&O) [2-5]・山登り法の改良型の増分コンダクタンス法 (Incremental Conductance Method, 以下略称 INC) [2-6]・スキャン法 (Scan Method, 以下略称 Scan) [2-7]と開放電圧法[2-8]である。3つのアルゴリズムは太陽電池アレイの出力電圧と電流を測り, それぞれの方法で昇圧回路用の基準値を計算することである。本文では主に検討するアルゴリズムは P&O 法と INC 法で, PSIM の C Block 機能によって実現する。C Block では C 言語で計算や論理判断ができる[2-9]。

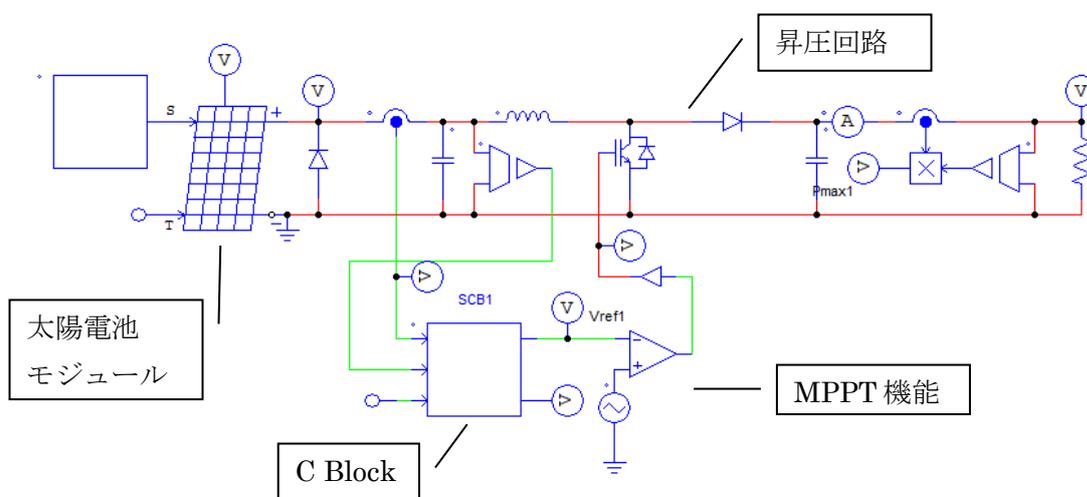


Fig.2-8 太陽電池モジュール・昇圧回路と MPPT アルゴリズムの組み合わせ

Fig.2-8 は PSIM で描いた太陽電池モジュール・昇圧回路と MPPT アルゴリズムである。本論文のシミュレーション用回路はこれに基づいて改良したものである。

### 2.3.2.3 SPWM 技術を用いる DC-AC インバータ

SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation)機能は直流電力を交流に変換するものである。この機能を利用し交流電圧と電流を生じる機器はインバータと呼ばれている。

インバータは, IGBT やパワーMOSFET 等の半導体スイッチ素子を複数個組み合わせて回路を構成し, そのスイッチ素子らを決められた順序で導通・開放を繰り返す事により, 直流を交流に変換する。[2-10]

実際には本節の SPWM と単純な PWM との間に相違点がある。

本論文では DC-DC コンバーターに用いるものを PWM と呼ぶ。変調波は一定の直流電圧である。搬送波とする三角波あるいはノコギリ波と比較して出力する波形は脈流になり、その脈流のデューティ比は変調波の次第で、比較的安定である。

一方、DC-AC インバータに用いるものを SPWM と呼ぶ。変調波は正弦波である。搬送波とする三角波あるいはノコギリ波と比較して出力する波形はデューティ比が周期的に変化している脈流である。様子が正弦波と似ている。よって、DC-AC あるいは AC-DC-AC インバータによく利用されている。

### 2.3.2.4 制御機構及び保護装置

基本的に太陽光発電システムはパワーコンディショナに制御される。パワーコンディショナに内蔵される機能は以下のようにまとめられる：

- コンバーターやインバータを制御する。
- パワーコンディショナの入力・出力・内部状態の各パラメータを測定・記録・及び監視する。
- 電力系統の状態を監視する。
- LVRT・FRT・単独運転防止等の系統保護機能を実行する。

### 2.3.3 接続箱・分電盤等

接続箱は、複数の太陽電池モジュールを適切に接続し、保守・点検時に回路を分離し、点検作業を容易にする。また太陽電池アレイに故障が発生しても停止範囲を極力少なくするなどの目的で保守・点検の容易な場所に設けることが大切である。接続箱の外観や内部構造は Fig.2-9 に示す。[2-11]

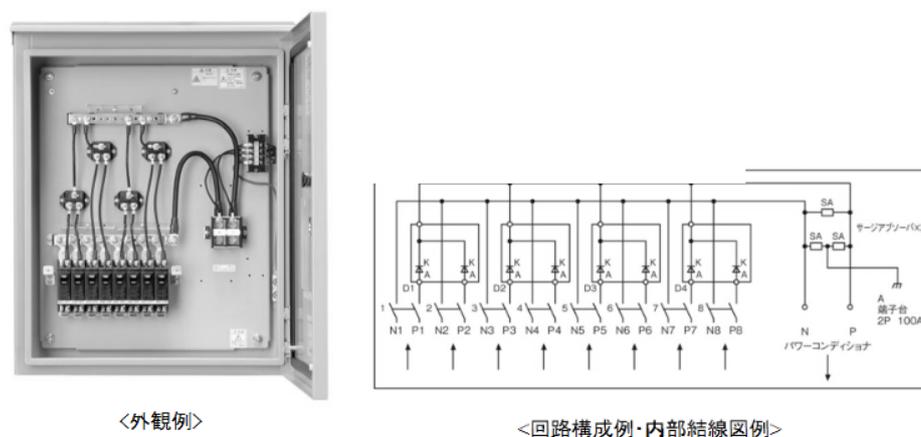


Fig.2-9 接続箱の図例[2-11]

分電盤は主に余剰出力買取の時に使用される。系統連系するシステムの場合にパワーコンディショナの交流出力を系統へ接続するのに使用する遮断器を収納する。[2-12]

## 2.4 太陽光発電システムの出力を左右する要因

### 2.4.1 地球が受ける光エネルギー・大気を通る距離と設置場所の緯度

地球が受ける太陽のエネルギーは太陽からの光輻射エネルギーである。太陽が光を出し、地球表面に辿り着き、地球における生物の営みや気候などに多大な影響を与えている。人類も、太陽の恵みとも言われる日の光の恩恵を享受してきた。

数値的な分析より、地球軌道付近で受ける太陽の仕事率（別称放射照度、以下では放射照度と呼ぶ）は太陽定数と言い、約 1366 [W/m<sup>2</sup>]に当たる。この数値は大気を通る距離 0，つまり大気圏外の太陽光の合計な仕事率である。それは Air Mass 0（略称 AM0）と呼ばれる。

一方、光が地球の大気を通ると、大気散乱・オゾン層及び水蒸気の吸収や雲・地表状況等での反射で、光エネルギーの損失が約 20%ある。概算として、地面に垂直到着できる仕事率は

$$P_0 = 1366 \text{ [W/m}^2\text{]} \times 80\% = 1092 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

である。この数値は大気を通る距離 1，つまり標準状態の大気に最短ルートに沿って垂直入射した太陽光が地面に到着した合計な仕事率である。それは Air Mass 1（略称 AM1）と呼ばれている。

そして、場所によるその緯度が異なることと季節の変化があるので、計算は以下の式(2-2)で行う：

$$P = P_0 \times \cos(\text{季節による太陽光入射角} \mp \text{当地の緯度}) \dots\dots\dots(2-2)$$

式(2-2)の「季節による太陽光入射角」は夏至の時が+23.4 [°]，冬至の時が-23.4 [°]，春分と秋分が 0 [°]である。23.4 [°]は地軸の傾きである。当地の緯度は北半球がプラス，南半球がマイナスである。例えば東京の緯度は北緯 35.7 [°]，夏至・冬至と春分秋分の放射照度は以下の式に示す：

$$P_{\text{夏至}} = P_0 \times \cos(23.4 \text{ [}^\circ\text{]} - 35.7 \text{ [}^\circ\text{]}) = 1066 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \dots\dots\dots(2-3)$$

$$P_{\text{冬至}} = P_0 \times \cos(-23.4 \text{ [}^\circ\text{]} - 35.7 \text{ [}^\circ\text{]}) = 560.8 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \dots\dots\dots(2-4)$$

$$P_{\text{春分}} = P_{\text{秋分}} = P_0 \times \cos(0 \text{ [}^\circ\text{]} - 35.7 \text{ [}^\circ\text{]}) = 886.8 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

数値的に春分の日の放射照度を 1.5 倍拡大すると地球軌道の放射照度に近いので、北緯 30 [°]付近の大気を通る距離が 1.5 (Air Mass 1.5, 略称 AM1.5)と呼ばれる。

### 2.4.2 雲の影響

雲は大気中に固まって浮かぶ水滴と氷の粒である。太陽光の障害物として地面が受ける放射照度に多大な影響を与える。よって、太陽光発電システムの大敵であると言わざるを得ない。

現在、太陽光発電システムが大量に導入されている。地理的にそのシステムは分散していると見られるので、電力系統の潮流計算は過去より複雑になっている。特に広範囲の視点から見ると、様々な地点にある発電システムが雲による多様な影響を受ける。この問題を解決するために、天気図分析・人工衛星のデータからの予測など様々な研究が盛んであるが、本論文では詳述しない。

### 2.4.3 太陽電池アレイ回路周辺の障害物の陰

太陽光発電システムの設置場所を選ぶ時、できるだけ周囲に障害物がない場所を選べば良いが、これは実際には難しい場合がある。また、時間が経って障害物が発生する場合もある。例えば長時間除草しないため草が高く生えることや、地域開発のために高い建造物が建設されてしまうこと等が珍しくない。その他、ゴミや鳥の糞・落ち葉など自然からの障害物が太陽電池モジュール表面に落ちる場合もある。こういう太陽電池アレイ回路の一部のみに影響する陰を「部分陰」という。

以上に述べる部分陰は普通に除草や清掃をすれば解決できる。しかし、清掃は定期的にしか行われない作業であるので、障害物が出現から清掃されるまでには時間が必要であり、清掃するまでに発電量を確保する方法及び部分陰の影響を技術的に防ぐ方法が求められる。本論文はその方法を検討する。

検討の最初の一步は様々な陰が放射照度へ与える影響を解析することである。これがわからないと数値的な解析ができないので、次節に検討する。

### 2.4.4 様々な陰が放射照度へ与える影響の実測と分析

太陽は球形の恒星である。太陽と地球距離は約 8 光分のため、地球表面から見れば、太陽からの光が近似的に平行光と認められる。逆に距離が非常に遠く(数光年以上)にある恒星の場合に点光源と認識される。

ここで、気象学で使われる太陽光に関する用語の定義をまとめる[2-13]：

- 全天日射：地表面が受け取るすべての太陽光
- 直達日射：太陽から直接地上に到達する光
- 散乱日射：太陽光が大気中の粒子等により散乱・反射を経て地上に届く光  
直射日光の水平面成分と散乱日射の和が全天日射となる。

点光源での陰と平行光源での陰はどう違うかを Fig.2-10 の上下の図に示す。点光源の影には明らかに遠近法の効果があるが、平行光源の場合には光源－障害物－観察者の一直線だけに生じ、これが直達日射での影である。

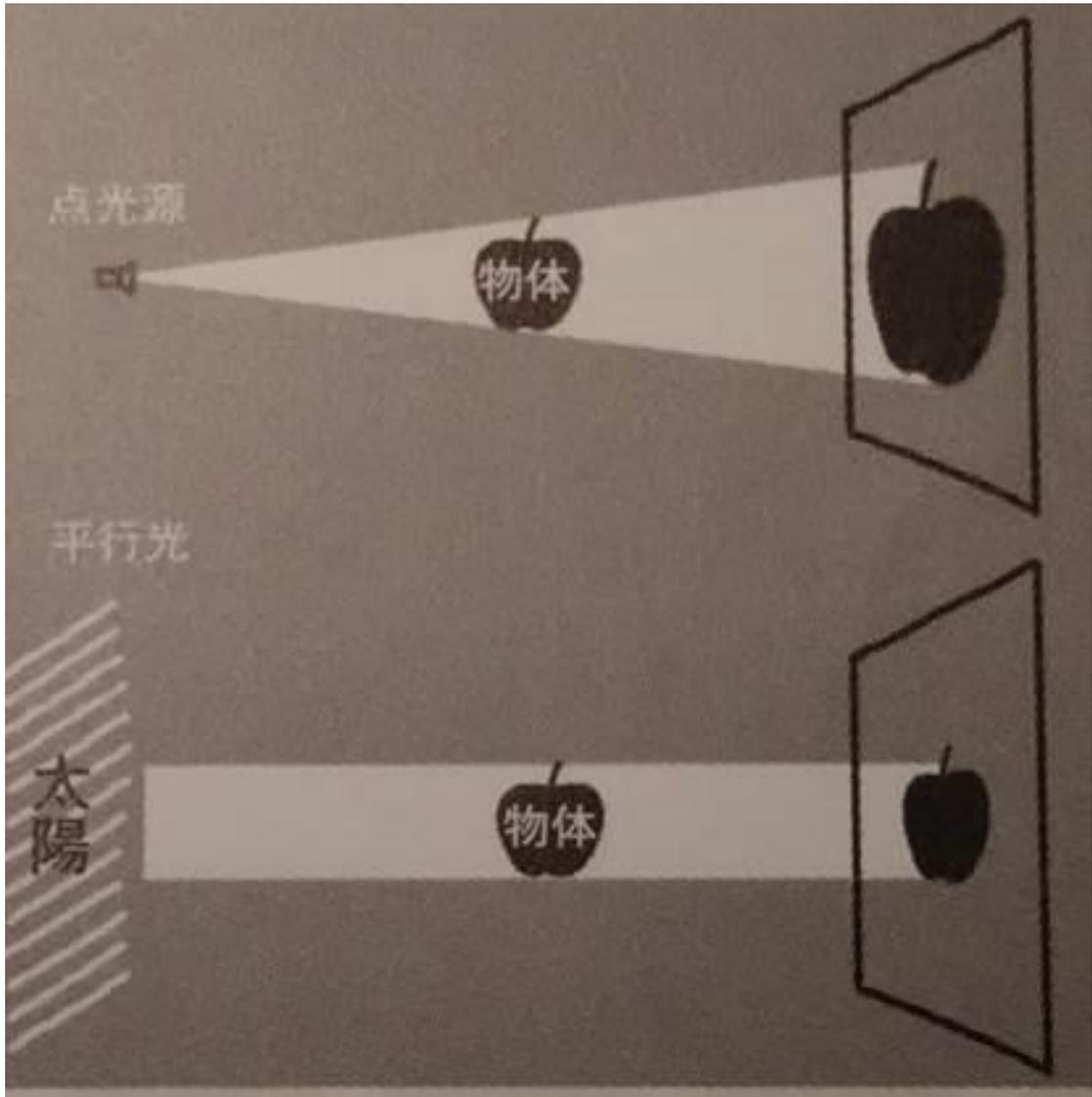


Fig.2-10 点光源と平行光の陰の区別

次に散乱光の有無による陰がどうなるかを検討する。基本的に惑星や小惑星等には大気が存在しないので、散乱光も発生しない。いわゆる直達日射のみの状況である。例えば、月の表面の例を挙げると、Fig.2-11のように、クレーターの中は真っ暗である。

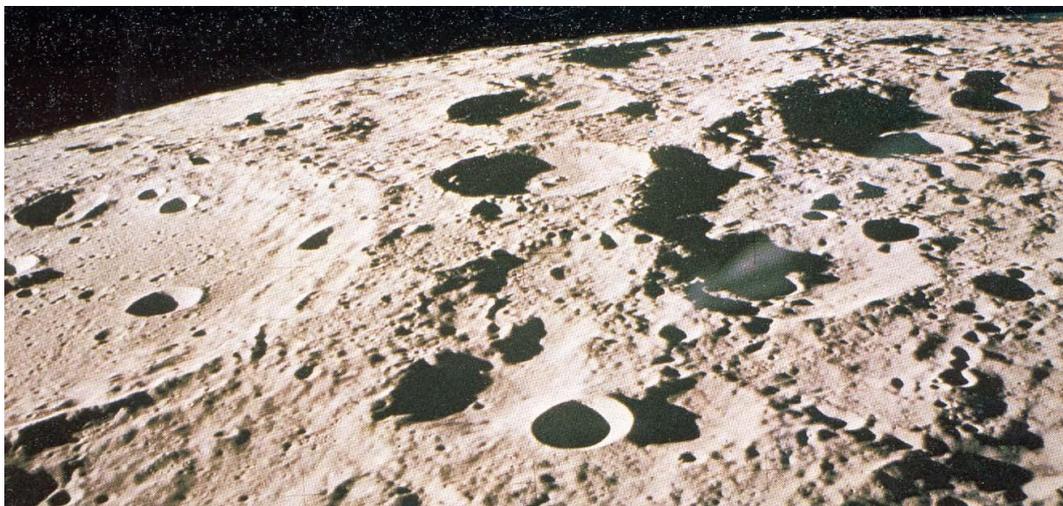


Fig.2-11 月球表面の陰領域

しかし、地球上では大気存在によって散乱光が発生する故、陰の領域が真っ暗にならない。その効果は Fig.2-12 に示すように、これが全天日射のおかげで砂丘の後ろは暗くなるが真っ暗ではない。



Fig.2-12 陰の領域と散乱光の効果

実測したデータより、全天日射・直達日射及び散乱日射と陰との関係を検討する。Table.2-3 のデータは著者が 2017 年 5 月から 6 月にかけて東京都世田谷区（北緯 35.6072 度，東経 139.6689 度）で実測した結果をまとめたものである。実験の様子は Fig.2-13 に示される。

実験で陰を生じる材料と方法は次に書く通りである：

「障害物なし」の場合に測定するのは全天日射である。晴れの日全天日射＝直達日射＋散乱日射と考える。

「半透明プラスチック」と「黒いプラスチック」と「不透明物」で多種類の影を模擬するものである。測定器と障害物の距離について 0 [m] と 1 [m] があるが、0 [m] は両者を近接することを、1 [m] は障害物の影を測定器にかけることと意味している。近接の場合では、材料の色により、光の透過率が異なる。距離 1 [m] のやり方は直達日射を遮断し、散乱日射のみ測定器に到達できることである。すると本実験では障害物・距離・影と測定器に到達する放射照度との関係は以下のように示される：

「半透明プラスチック (0 [m] 間隔)」：

- 太陽電池モジュールの表面に留まるゴミの影（薄身）
- 放射照度＝全天日射×透過率（高い）
- 透過率が約 0.8～0.9

「半透明プラスチック (1 [m] 間隔)」：

- 薄い雲での陰
- 放射照度＝直達日射×透過率（高い）＋散乱日射－距離による損失
- 透過率が約 0.8～0.9

「黒いプラスチック (0 [m] 間隔)」：

- 太陽電池モジュールの表面に留まるゴミの影（厚身）
- 放射照度＝全天日射×透過率（低い）
- 透過率が約 0.1～0.2

「黒いプラスチック (1 [m] 間隔)」：

- 太陽電池モジュールの周りに障害物の陰
- 放射照度＝散乱日射
- 透過率がほぼ 0

「不透明物 (1 [m] 間隔)」：

- 太陽電池モジュールの周りに障害物の陰
- 放射照度＝散乱日射
- 透過率がほぼ 0

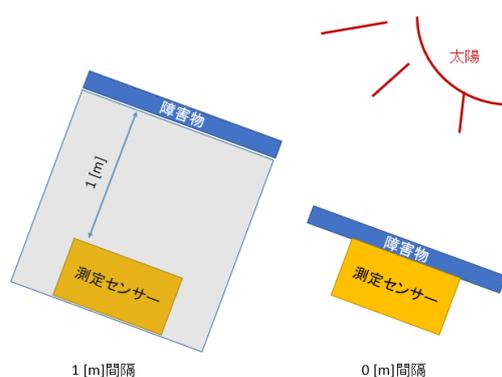


Fig.2-13 実験の様子

Table.2-3 日射と陰の実測データシート(2017年)

番号	日付	時間	天気状況	障害物 なし	半透明 プラス チック 0 [m]	半透明 プラス チック 1 [m]	黒い プラス チック 0 [m]	黒い プラス チック 1 [m]	不透明 物 1 [m]	
				以下の各数値単位： [W/m <sup>2</sup> ]						
1	5月27日	13:30	晴れ時々曇り	1062	880	364	142	152	152	
2				1075	874	240	204	142	141	
3				1074	887	245	165	136	143	
4	5月27日	16:15	晴れ時々曇り	790	712	138	127	140	142	
5		16:40	晴れ時々曇り	833	666	227	148	147	148	
6				805	666	155	103	130	119	
7		18:00	晴れ時々曇り	40	40	40	40	40	40	無直射
8				207	207	207	207	207	207	無直射
9	5月28日	10:30	曇り	62	62	62	62	62	62	無直射
10		15:40	曇り時々晴れ	973	787	226	131	177	184	
11		16:30	曇り時々晴れ	771	645	171	159	90	92	
12		17:10	曇り時々晴れ	542	347	83	53	77	77	
13	5月31日	13:00	曇り時々晴れ	976	807	211	251	95	101	
14	6月2日	9:30	快晴	995	828	154	215	112	111	
15				1002	808	177	176	119	118	
16				1009	821	175	200	113	119	
17		10:45	快晴	1025	793	175	144	100	106	
18				1021	846	170	193	100	108	
19				1026	842	156	166	95	105	
20		11:05	曇り	151	151	151	151	151	151	無直射
21				122	122	122	122	122	122	無直射
22	6月6日	8:55	曇り	233	233	233	233	233	233	無直射
まとめ										
平均値	無直射(曇りの日)のデータを無視する			936.19	763.06	191.69	161.06	120.31	122.88	
					①	②	③	④	⑤	
割合率	相違なる状況で違う材料の透過率				81.51%	20.48%	17.20%	12.85%	13.13%	

放射照度の関係について実測し、5～6月の東京では晴天に放射照度最大値は1000 [W/m<sup>2</sup>]を超えることが珍しくなかった。ところが、実際の固定している太陽電池アレイ回路が受けられる放射照度は季節・時間よりの太陽位置・アレイの設置斜め等の影響を受け、常に最大の放射照度を受けることができないのは事実である。データより天気の影響も把握できる。曇り空の場合は直射日射がなくなるため、陰もなくなりどの方向でも放射照度は均一になった。これは散乱日射であると考え。Table.2-3のまとめの部分进行分析。無直射のデータを除いた放射照度の平均値は936.19 [W/m<sup>2</sup>]である。陰が生じる方法による割合率を計算した。前述の薄身のゴミや塵の場合の透過率は約80% (20%左右の損失)である。厚身のゴミ・モジュール周りの障害物と想定する透過率は約15% (85%左右の損失)である。本論文での陰の定義は太陽電池アレイ回路の周りにある簡単に取り除けない障害物での周期性を有する陰である。よって、放射照度の低減程度「15%」を利用し、後文のシミュレーションで部分陰を再現する。積雪・ゴミや塵などの陰についての簡易的な検討は付録第3章にて説明する。

なお、④と⑤の透過率平均値では約0.5%の差が測定誤差であると考え。

## 2.5 太陽光発電システムの保安性

### 2.5.1 太陽光発電システムの事故例

太陽光発電システムは日射さえあれば発電できるという特徴がある。たとえ発電してほしくない場合でも光があれば発電し続ける。そのため、火災や自然災害時には障害となる場合がある。災害でシステムが破壊されても太陽電池モジュールは、そのままでは発電停止しないため、電流が破壊されたアレイの配線や破損しているモジュールから漏れ、短絡・出火や感電事故の原因になる。一方、発電システムを点検する際にも直流配線内部を無電圧にしたいという現場ニーズは大きい。

最近の報道や公的機関の報告書にも見られるように太陽光発電システムが破損・浸水することが原因で太陽電池モジュールが漏電したり、消防隊員が感電したりなどの事故はあとを絶たない。

以下に公の報告[2-14]から過去の発生した事故例を引用する。

#### 2.5.1.1 火災事例

ここでは、PV が設置された住宅の火災をいくつか紹介する。まだ火災事例が少ない状況ではあるが、その中でも把握できた火災の概要を述べる。これらの火災には、火災の原因が PV であるものとそうでないものとに分かれる。

##### 信越地方における火災事例

屋根上に後付けされた PV から出火した事例である。出荷する 3 日前に居住者から販売店に「太陽光発電のブレーカーが落ちる」との連絡が入った。販売店員が配線の漏電をチェックし、4 ストリングの内の 2 ストリング目に絶縁不良を発見し、2 ストリング目の接続を遮断した。外観からは特別な異常が見つからなかった。出火し、消防が駆けつけた時には、居住者が屋根の上になり、園芸ホースで散水して消火し終えていた。出火した太陽電池モジュール（以下、モジュール）は 3 日前に接続を遮断したストリングではなかった。燃えたモジュールは 3 枚で、1 枚はモジュール全体が焼損し脱落していた。駆けつけた販売店員がモジュールを外し、回収して原因を調査した。モジュールを外した時に、モジュールと屋根の間に落ち葉や枝が溜まっていた。屋根上の配線を小動物がかじったような跡が見つかった。

##### 北関東地方における火災事例

屋根上に後付けされた PV から出火した事例である。車で走行中の近所の人々が屋根の上から煙が出ているのを見つけ居住者に知らせた。居住者が PV 設置業者と消防に電話連絡を入れた。焼損したのは 1 枚のモジュールの 80 [cm]x60 [cm] くらいである。焼損していた部分のモジュールの裏の隙間には余剰配線が

まとめて押し込まれていて、鳥の巣（枯れ葉や枝）もあった。この部分の配線には溶融痕が認められた。

#### 関東地方における火災事例

工場建屋の屋根上に PV を設置する工事の期間中に出火した。まだ発電の運用は始めていないときであった。屋根上へのモジュールの設置が終わり、接続箱やパワーコンディショナへの配線のつなぎ込みを残して休日を迎えたため、配線の端部をビニルテープで巻き、屋根の上にまとめて放置して作業を終えた。雨が降った後に晴天になり、まとめてあった配線端部から出火した。配線端部の処理としてビニルテープを巻いていたが、ストリング毎に＋端子と－端子を一緒にビニルテープで巻いていたということで、雨水がテープ内に浸み込み絶縁が悪くなったところで日射により発電が開始し、端部の両極間で絶縁不良により出火に至ったと考えられる。

#### 東海地方における火災事例

屋根上に後付けの PV が設置された住宅が火災になった。出火原因は PV とは関係ないと考えられている。2階の居室から出火し、屋根を焼き抜けモジュール数枚を焼いた火災である。屋根上のモジュールと配線が焼損し、配線が途中で切れ垂れ下がっている状態であった。この配線が揺れた時に、配線がモジュール架台等の金属部に触れることで放電が起こっていた。この放電は止めることができなかった。

#### 東北地方における火災事例①

東日本大震災での火災事例である。3階建て住宅の1階車庫内に設置された PV のパワーコンディショナが津波により浸水し、パワーコンディショナ内部の配線から出火した。津波被害を受けた翌日の午前中に焼損を発見した。発見時は日射のある天気、発電による電力で出火したものである。住民は避難所にいたため建物内は無人数であった。発見時、パワーコンディショナ内はまだ湿っていた。駆けつけた消防隊員が粉末消火器で消火した。被害はパワーコンディショナ内部だけである。海水が端子部分に付着することで、端子の腐食、端子台等の絶縁劣化等が起こったのではないかと思われる。

#### 東北地方における火災事例②

東日本大震災での火災事例である。2階建て住宅の外壁に設置された PV のパワーコンディショナが津波により浸水し、配線に付着した海水の影響で絶縁が劣化し、微小電流が流れ続けることで発熱が起こり、約2ヶ月後に出火したと思われる。住民は避難所にいて建物内は無人数であった。火災を発見したのは近くにいた作業員である。消火活動はなかった。被害は金属筐体でできたパワーコンディショナ内部だけで、配線被覆部分が焼損した。

### 東北地方における火災事例③

東日本大震災での火災事例である。2階建て住宅1階外壁に設置されたPVのパワーコンディショナ（接続箱機能も内蔵）と思われる機器が津波で浸水した。屋根上の太陽電池から電力入力配線に力がかかり機器筐体から配線が脱落したことにより短絡し、配線被覆が焼損したと考えられる。被害は筐体付近の配線のみである。建物周辺は停電中であった。焼損が発見されたのは津波被害から約2週間後であった。

#### 2.5.1.2 感電事例[2-14]

ここでは、PVが設置された住宅の火災において消防活動をしていた消防隊員が感電した事例を紹介する。

##### 断熱材で感電した事例

屋根一体型のPVを設置した2階建て住宅が火災となった。出火箇所はモジュールの配線部分と疑われている。この火災でモジュールは燃焼により穴が開いた。消火により火勢が収まり2階屋根裏の残火確認を行おうとした際に消防隊員が感電した。住宅の壁や屋根には断熱材が使われており、火災の影響により、断熱材がむき出しの状態となっていた。この断熱材は消火水が浸み込んだ状態であった。2階の屋根裏を確認するため、吹き抜けの玄関に梯子をかけ、消防隊員が登った。この際、消防隊員は一般住宅火災の消火活動で身につける個人装備（防火帽・防火服・防火手袋（以下、手袋）・ゴム製防火靴）を着装していた。梯子に乗った消防隊員が、片手を梯子に、もう一方の手で断熱材に触れた時、手に電撃を感じた。幸い梯子から転落する等の被害はなかった。

##### 屋根裏での活動中に感電した事例

屋根一体型のPVを設置した2階建て住宅が火災となった。出火原因はPVとは無関係と思われる。発見時、モジュールのある屋根の隙間から煙が確認でき、モジュールに焼けはなかったが、鎮火後にモジュールが焼損し穴が開いていることを確認した。消火活動中に火災建物への商用電源の供給は電力会社により遮断された。消火活動を行った後、残火確認のため、消防隊員は、屋根上でのモジュールの引き剥がし作業や2階屋根裏内でモジュールを外に押し剥がす作業をしていた。消防隊員は一般住宅火災の消火活動で身につける個人装備を着装していた。屋根上での引き剥がし作業中、破壊器具をモジュールの間に差し込み、てこの原理でモジュールを浮かし、手で引き剥がそうとした時にビリビリと手に感じた。また、屋根裏でのモジュールの押し剥がし作業中、片手を建物の金属柱に置き、もう一方の手でモジュールの裏面を押した時に、バーンという電撃を感じた。幸い屋根から転落する等の被害はなかった。

### 2.5.2 事故例よりの考え

複数の事故例より、太陽光発電システム発の一次事故と他の事故や災害に破壊されたシステムからの二次災害が火災の要因となった。特に二次災害の例が多かった。この問題について研究機関や産業界は対策[2-15]を求めているが、決定的な解決案や運用例が得られていない。著者は太陽光発電システム発の一次事故について、定期点検や清掃をきちんとすると事故を防ぐことができるものの、人件費等の経済性の視点から考えると、頻繁な点検や清掃はほぼ無理であるのは現実である。よって、太陽電池アレイ回路に対する常時監視システムがあれば、アレイ回路内部の特性や故障を早期発見することが期待できる。

なお、多く発生してしまった二次災害により、著者は災害時に太陽電池アレイ回路の配線内部を無電圧とする必要性があると考え。すると災害時や緊急時にたとえ配線が破壊されても、漏電やアークが発生しにくくなる。

## 2.6 太陽光発電システムに関する従来の研究

### 2.6.1 出力改善のためのソフトウェア的な研究

太陽電池の I-V, P-V 特性は非線形であるから, 最大の電力を得るためには運転中に常に最大電力点を検索する必要がある。その技術としてよく使用されているのは山登り法 (以下 P&O 法と略記) [2-16]・増分コンダクタンス法 (以下 INC 法と略記) [2-17]・Scan 法[2-18]・開放電圧法[2-19]などである。これらの中で安定性も高く効率の良いのは P&O 法と INC 法であって, 最近でも, さらなる性能改善のために研究が行われている。例えば, これらシステムにおけるデータの収集, 計算, 比較, 動作等のうち[2-16]~[2-17]計算[2-20]と比較[2-21]および動作[2-22]~[2-23]の段階でファジーを導入すると制御精度が改善できること[2-20]~[2-24]が報告されている。ただし, こうした改良法の多くは制御ソフトに関するものであり, 回路構成の改善を視野に入れた研究例は比較的少ない。

一方, ハードウェアに関する研究例は比較的少ない。その中の多くはマイクロコンバータ・Reconfigurable Network など半導体スイッチを多用し, 部分陰の影響を回避するためアレイ回路を能動的に再構築したり, 部分回路ごとの最適化を行ったりするものである。それらの中には, 分断化に関する三種類の手法の提案と比較[2-25], 直並列切り替え[2-26]~[2-27], アレイを任意に再構築する研究[2-28]と全てのダイオードを半導体スイッチで切り替える研究[2-29]もある。ところが, 著者らは半導体スイッチがコスト面で不利となり, 広範囲への普及を狙うにはあまり多くの半導体を使用しないほうが望ましいと考える。ソフトウェアの改善と必要最小限のハードウェア改良とを組み合わせた総合的な部分陰への対応には, 検討の余地が残されていると考える。

## 2.6.2 安全性向上の研究

基本的に太陽光発電システムは安全性が高く・頻繁な点検や修理が必要無い発電施設であると認識されている。ところが、それは世の中からの誤解であり、発電設備である以上、電気的な危険性が存在するのは当然である。この安全性に関する対策[2-29]は研究機関や産業界から求められている。決定的な解決案及び応用例は得られていないが、いくつかの特許が存在する。例えば、太陽電池モジュールを無線で制御する結線箱[2-30]、各モジュールを保護する装置[2-31]、モジュールごとに MPPT アルゴリズムを実行・保護する装置[2-32]、モジュールの発電状態を監視・保護する装置[2-33]、モジュールを遠隔操作する装置[2-34]等である。このうち[2-34]は著者の考え方と共通点が多い、ただし、以下に述べるような理由で、この提案には課題があると考ええる。

著者が安全性向上のために当初開発した装置は、受動素子で構成した。しかし、シミュレーションと実験を通じて受動回路には限界があることが分かったため、多くの検討や改良を行い、実験を重ねて本論文の第 6 章で述べた装置の提案に至った。その後の文献調査で[2-34]の特許が申請されていることを知ったが、その回路の動作をシミュレーションで通じて検討したところ、複数のミスがあって動作の信頼性が不十分であることが分かった。

そこで著者はこの課題について検討し、太陽電池モジュール直流電圧の遮断装置という解決策を提案した[2-35]~[2-36]。本論文の第二のテーマでは著者の提案する遮断装置についての必要性と回路構成を検討する。その上に、実機実験を行い、実際に作られた装置の特性を解析すると共に、装置の有用性を検証する。

# 第 3 章

## 目的

本研究では太陽光発電システムに対する 2 つのテーマを取り扱っている。それぞれの研究目的は出力改善及び安全性向上である。

**出力改善**とはシステムの定格出力を増大することではなく、部分陰での影響を技術的な手段で削減することである。出力改善ができれば、発電量の増加とともに、売電収入も増加することで利益になる。

主要研究内容は太陽電池アレイ回路の内部に短絡ブリッジを何箇所か架けることである。架ける場所によって複数の手法を提案し、それらの性能や有用性を比較検討する。提案した手法の有効性をシミュレーションソフトウェアで数値的に検討する。同時にシミュレーションの信頼度と現実性を高めるために実天気データの応用や発電量統計などの手法を開発する。更に、研究室で実験できる範囲で LED 光源を自作し、簡易的な太陽電池アレイ回路で実験検証も行う。

目標は以下のように示す：

Table.3-1 出力改善に関する研究目標

内容	目標
アレイ回路の分断化手法	①部分陰での出力電力を 20%向上とする
	②10 年間の運転時間に対して故障率 2%未満
昇圧回路についての改良	③昇圧率・目標 1.5 倍 ④アレイ回路電圧の変動範囲： ▶ リップル電圧 3 [Vp-p]未満 ▶ 500 [W/m <sup>2</sup> ]以上の放射照度でアレイ回路の電圧を 250 [V]付近に安定すること
部分陰の位置判定	⑤一位陰（部分陰のかかる太陽電池モジュールが 1 箇所となる場合）の場合に正確に判定できること

安全性向上とは不要時・緊急時及び災害時に太陽光発電システムの二次災害が防げるようにすることである。今まで複数の事故例より、災害時に太陽光発電システムが機械的な損傷を受け、漏電やアークが発生するのは珍しくなかった。そのために火災に至る二次災害になるケースが多かった。よって、どうすれば太陽電池アレイ回路の配線内部の直流電圧を遮断できるのかという点は二次災害が予防できるかどうかのキーポイントである。そのためにこの直流電圧を遮断する装置を提案した。本論文で遮断装置の各分枝回路の紹介・開発経緯及びその改良を説明し、シミュレーション及び実験で有用性を検証する。その目標をTable.3-2に示す。

Table.3-2 出力改善に関する研究目標

内容	目標
遮断装置 単体性能	①投入：<100 [msec], リレーの種類次第 開放：<1 [sec]
	②電源電圧が 10 [V]以上の時に投入・開放動作可能
装置省エネ化	③最低効率 90%以上
通信の安定化	④ノイズにて誤動作しないこと（制御信号電圧 20 [V]まで）
直列運転	⑤装置 2 個～4 個の直列運転ができるようにする

## 第4章

# 出力改善に関する研究

## 4.1 太陽光発電システムの改良提案

### 4.1.1 太陽電池アレイ回路の分断化

#### 4.1.1.1 部分陰影響の仕組み

部分陰の定義：太陽電池アレイ回路の周りにある簡単に取り除けない障害物での周期性を有する陰である。ここでの周期的の意味は太陽の日周期に対することであり、ほぼ毎日決まった時間帯に陰が生じる。このような陰は簡単に消去できないので、研究内容とする。この陰に対する数値的な定義は背景の章に述べた通り、元の放射照度の「15%」程度まで低減することである。一般にいう「部分陰」には他種類の陰もある。積雪・ゴミや塵などによる陰についての研究は今後の課題とするが、単純な検討は付録第3章にて説明する。

前述より、現在よく利用される太陽電池アレイの構成方法は複数枚の太陽電池モジュールを直列してストリングとしてから、複数のストリングを並列すること[5-1]である。詳細は Fig.4-1 に示されている。

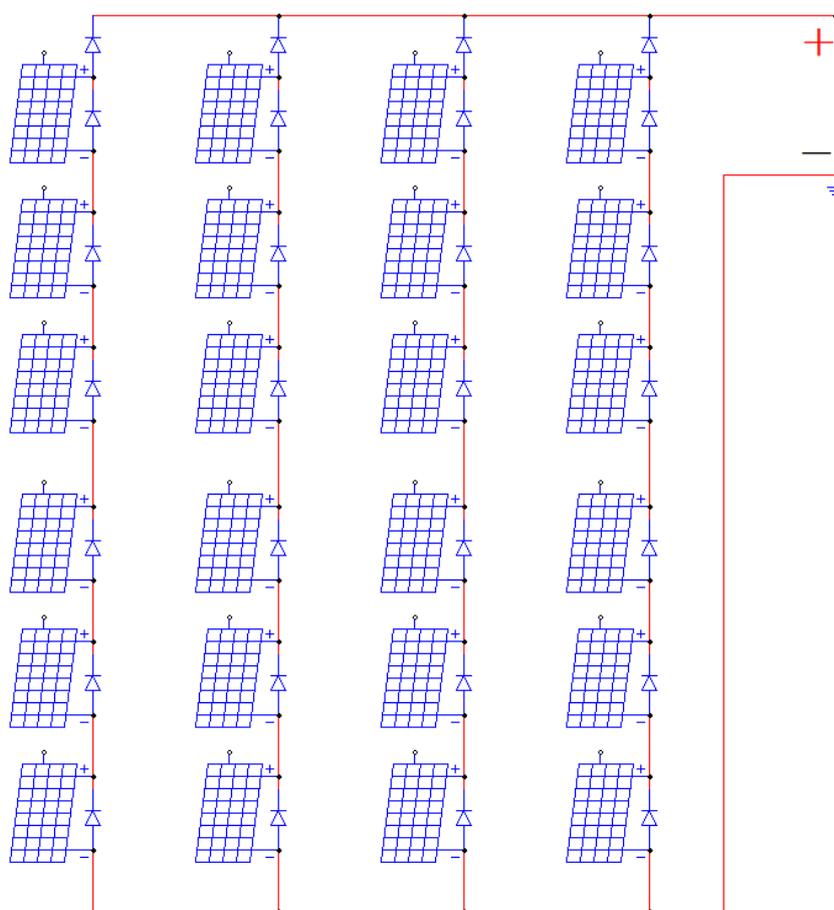


Fig.4-1 通常アレイ回路

Fig.4-2 のような部分陰が発生すると、陰にかかったストリングの出力電力が低下した。

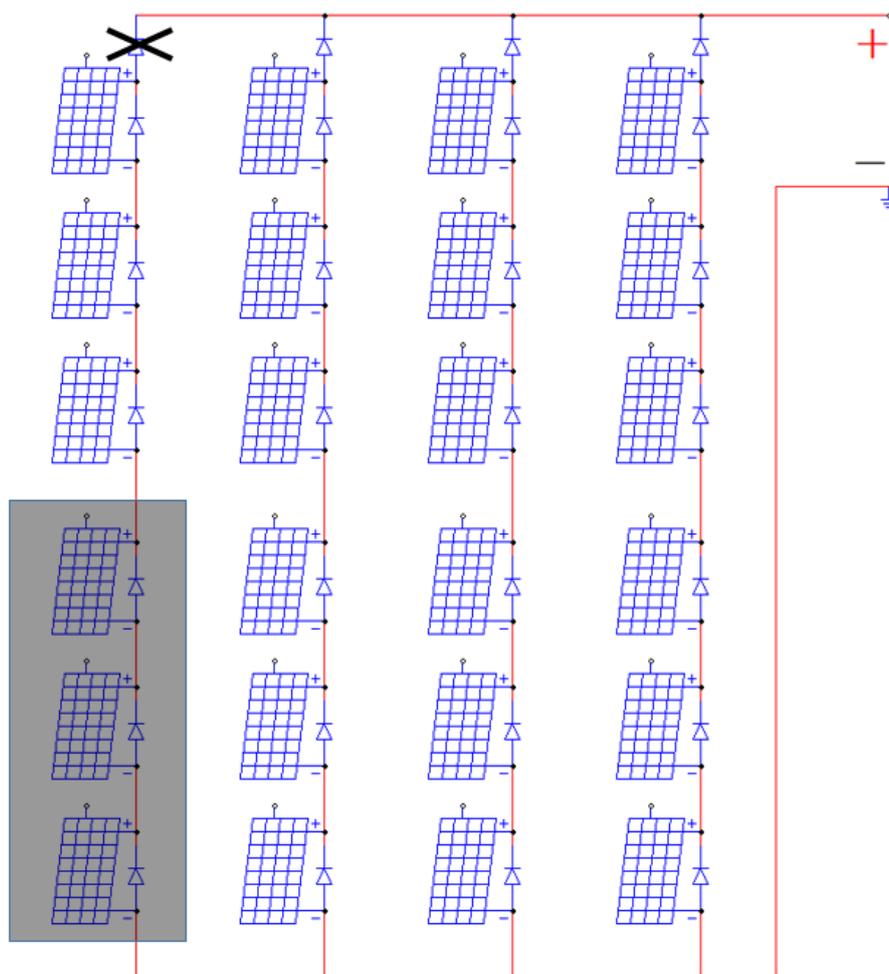


Fig.4-2 部分陰での通常太陽電池アレイ回路

その状態で、陰にかかったストリングの出力電流が低下し、重ね合わせの理で負荷に対する電圧も低くなった。そのため、ストリングの先頭にある逆流防止ダイオードが導通できなくなり、一本のストリングの出力をまるごと失ってしまった。そのまま太陽電池アレイ全体の出力は残ったストリングからしか得られない。

解決策は昇圧回路の動作でアレイの電圧を下げることである。詳細は既に失効したストリングの逆流防止ダイオードを導通させるために、昇圧回路の動作でアレイ電圧を下げ、可能な限り出力電流を搾ることである。このような動作は最大電力点追従 (MPPT) である。

#### 4.1.1.2 アレイ回路の分断化

部分陰問題を解決するために、従来のアレイ回路に短絡ブリッジをかけることを提案した。仕組みとして、短絡ブリッジと追加する逆流防止ダイオードで部分陰に影響された部分を隔離し、残っているアレイ回路を普通に出力させることである。各ストリングを分断化して各ストリングの間にブリッジをかけることが Fig.4-3 に示される。

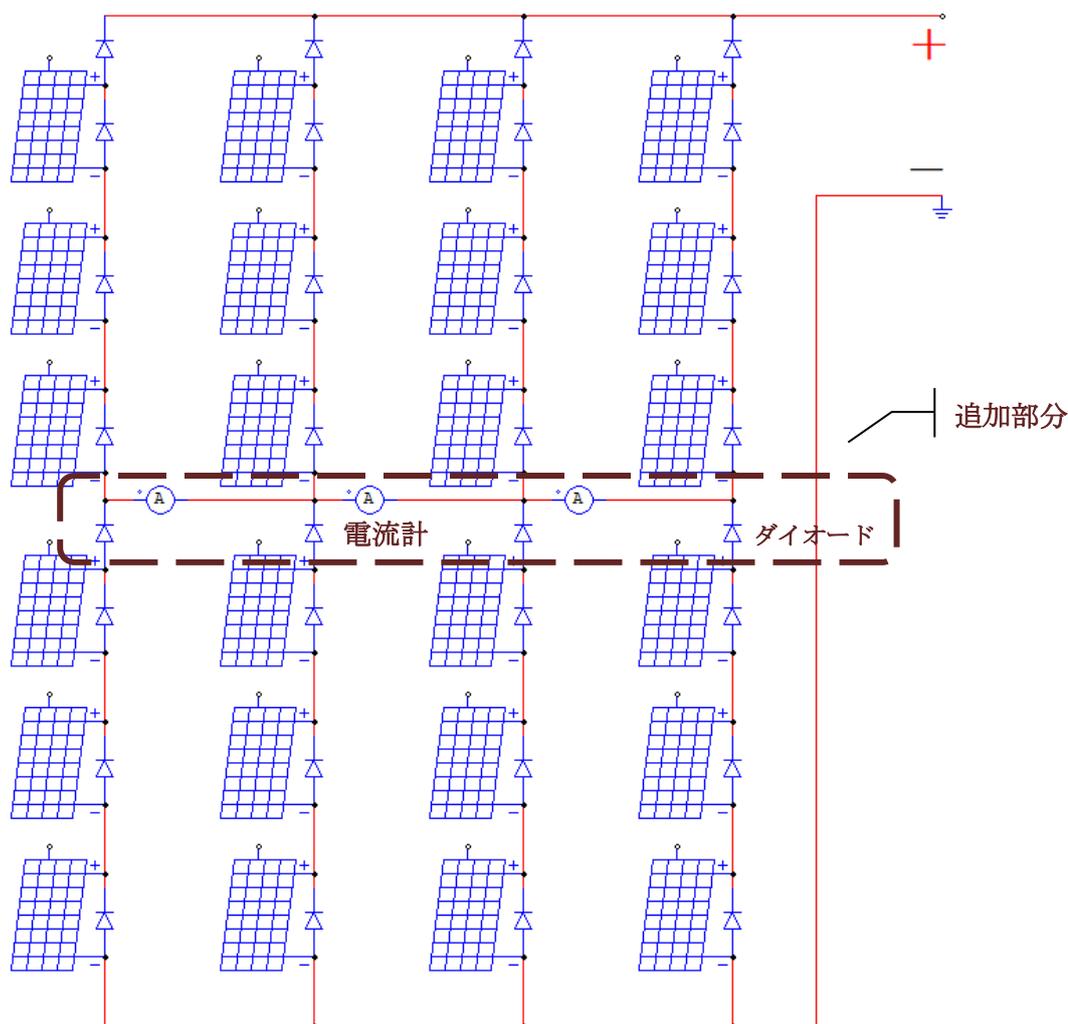
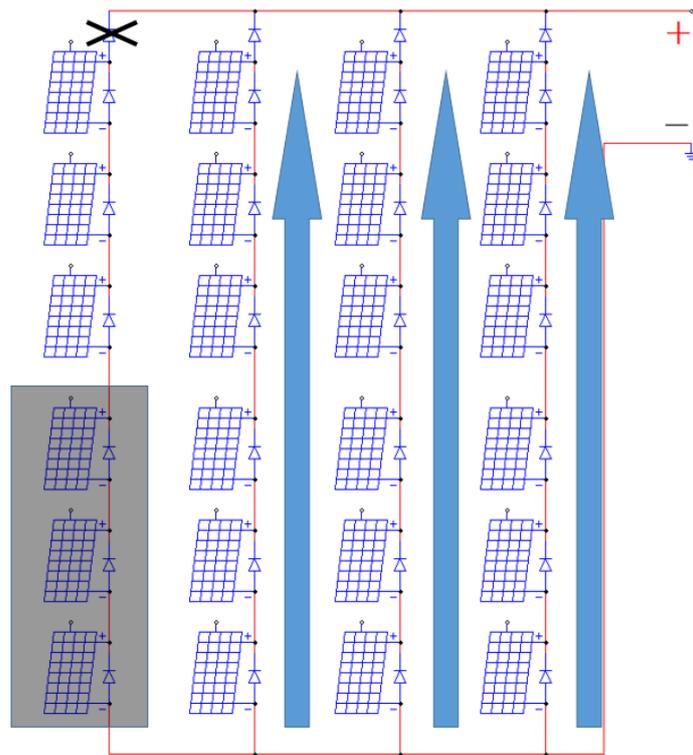


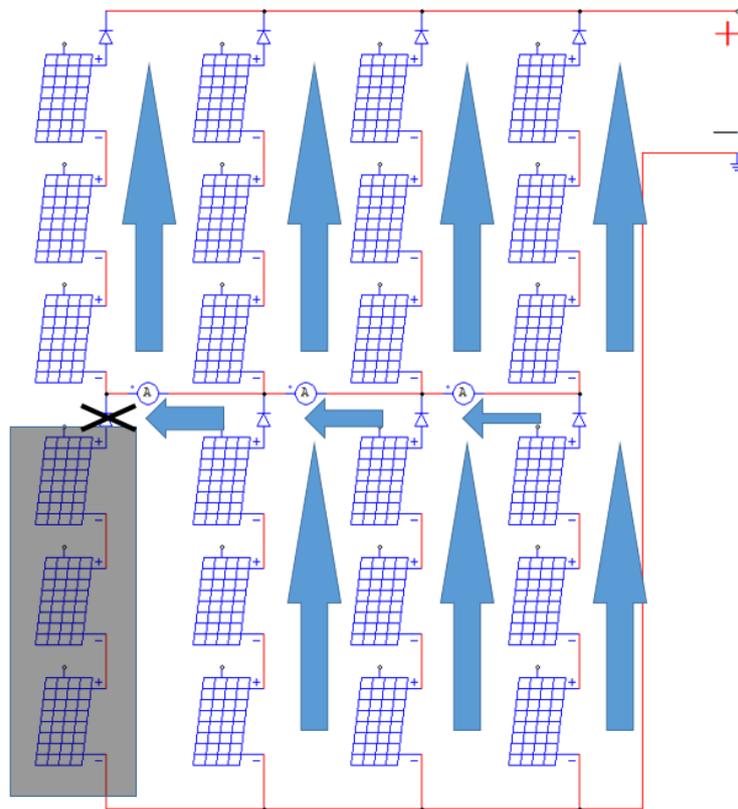
Fig.4-3 分断化した太陽電池アレイ回路

本論文では短絡ブリッジをブリッジと省略している。

Fig.4-4は部分陰での通常アレイ回路と分断化アレイ回路の電流の向きを比較する図である。図により、部分陰発生時にアレイ回路の分断化で元の出力できない一本のストリングには影響されない部分が出力できるようになる。具体的な比較は後節に述べる。



(a) 通常アレイ回路



(b) 分断化アレイ回路

Fig.4-4 部分陰での通常アレイ回路と分断化アレイ回路

### 4.1.1.3 分断化する手法

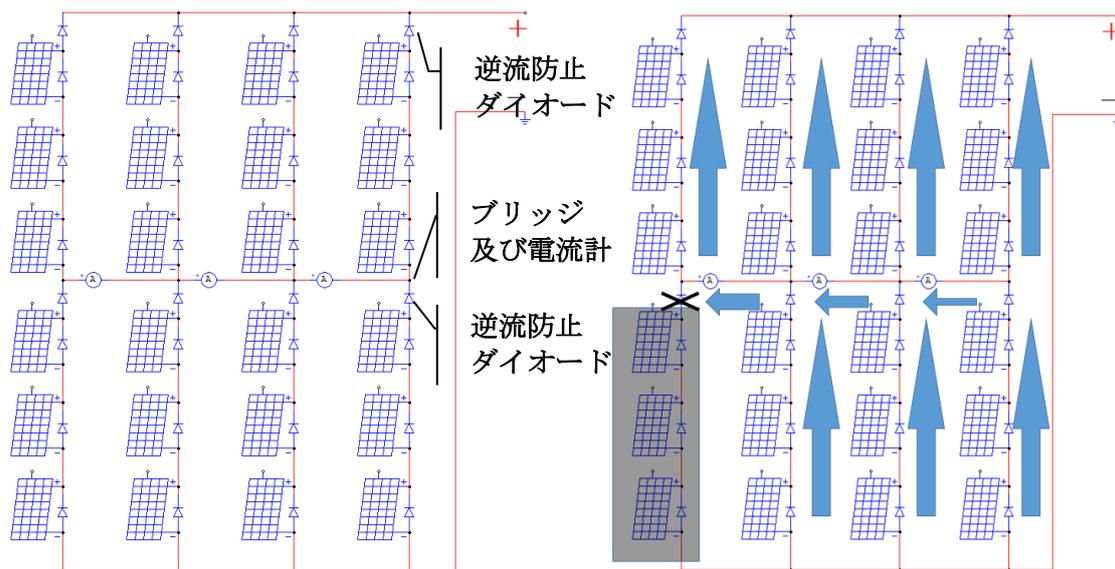
ブリッジの設置でアレイ回路を分断化することには制約がある。不適切なポイントにブリッジを架けると通常時に電流が流れてしまうので、短絡や事故を誘発する可能性がある。よって、本研究では分断化の規則を以下のように設定する：

- 通常時にブリッジの両端に同じ対地電圧があること。
- ブリッジで分断化されたモジュールのクラスタのバランスを取ること。
- ブリッジが設置される場所に逆流防止ダイオードを入れること。

具体的な各分断手法を紹介する。大きく分けて **Bridge Link** (ブリッジ分断法, 略称 BL), **Total Cross Tied** (全分断法, 略称 TCT), **Honey Comb** (蜂の巣分断法, 略称 HC) である。

一般的に太陽電池アレイ回路が  $xSyP$  のように表記される。 $xS$  とは  $x$  枚モジュールが直列接続し、一本のストリングを構成することである。 $yP$  とは  $y$  本のストリングを並列接続することである。ここに例とする  $6S4P$  式の太陽電池アレイ回路は、6枚モジュール直列4本ストリング並列接続していて、総計24枚モジュールで構成されるものである。この回路に以上に述べた三種類の分断法を適用すると以下ようになる。

a. 二分の一分断法 (循環ループなし) 『分断法所属：BL類』



回路の構造

部分陰でのブリッジ電流

Fig.4-5 6S4P アレイ回路の二分の一分断法 (循環ループなし)

Fig.4-5 に示される回路は本研究で最初期に行った分断化手法である。構造的に太陽電池アレイ回路を半分に分けた。この手法のメリットは構造のシンプルさである。デメリットは部分陰が発生する際にブリッジに流れる電流が集中し

すぎ、電流の再配分にとって悪い影響がある可能性がある。特にシャント抵抗を電流計とする場合には両端部間の抵抗が高いため、ブリッジ電流を阻み、電流の再配分に悪影響がある。なお、ブリッジを架ける場所に逆流防止ダイオードが不可欠である。

b. 二分の一分断法（循環ループあり）『分断法所属：BL 類』

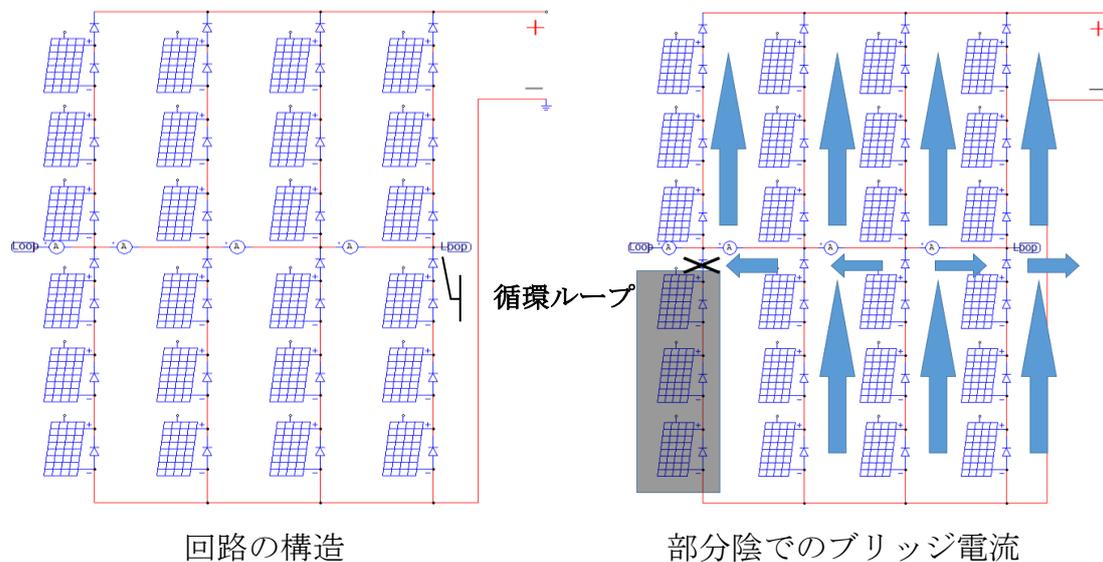


Fig.4-6 6S4P アレイ回路の二分の一分断法（循環ループあり）

Fig.4-6 に示される回路は Fig.4-5 の改良版である。循環ループとはアレイ回路の両端部のストリングを繋げる短絡ブリッジである。メリットはループの追加で両端部間の抵抗が一致にされるので、再配分電流をより一層流れやすくすることである。デメリットは構造の変化により、ブリッジ電流の様子は Fig.4-5 と異なる。

c. 全分断法『分断法所属：TCT 類』

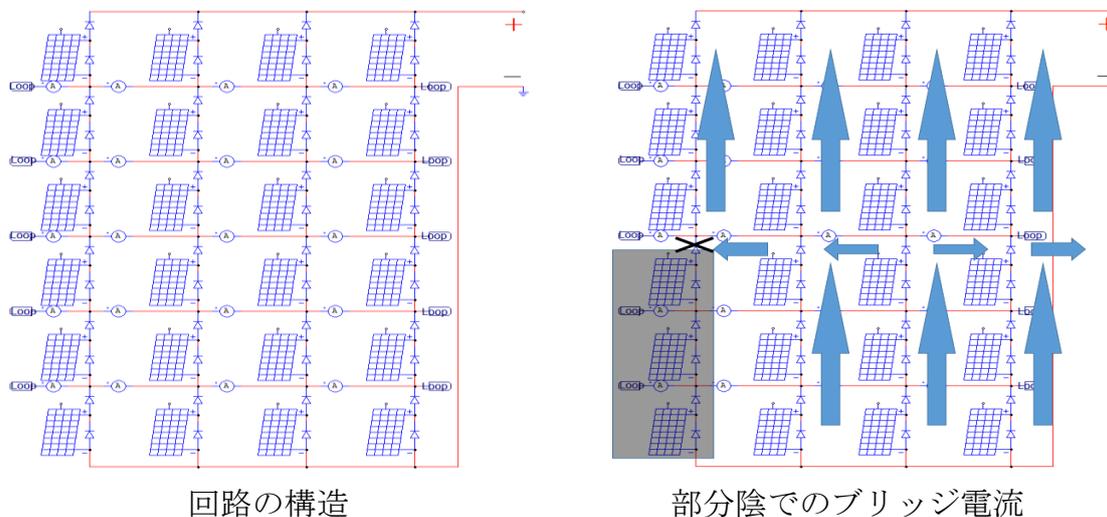


Fig.4-7 6S4P アレイ回路の全分断法

この手法はすべてのモジュールを単独に分割するものである。メリットは再配分電流が流れやすいこととブリッジ電流からの情報が多く取られることである。デメリットはブリッジが多すぎるので構造的に安定性や点検する際の難易度が問題になる可能性があることである。

#### d. 蜂の巣分断法『分断法所属：HC 類』

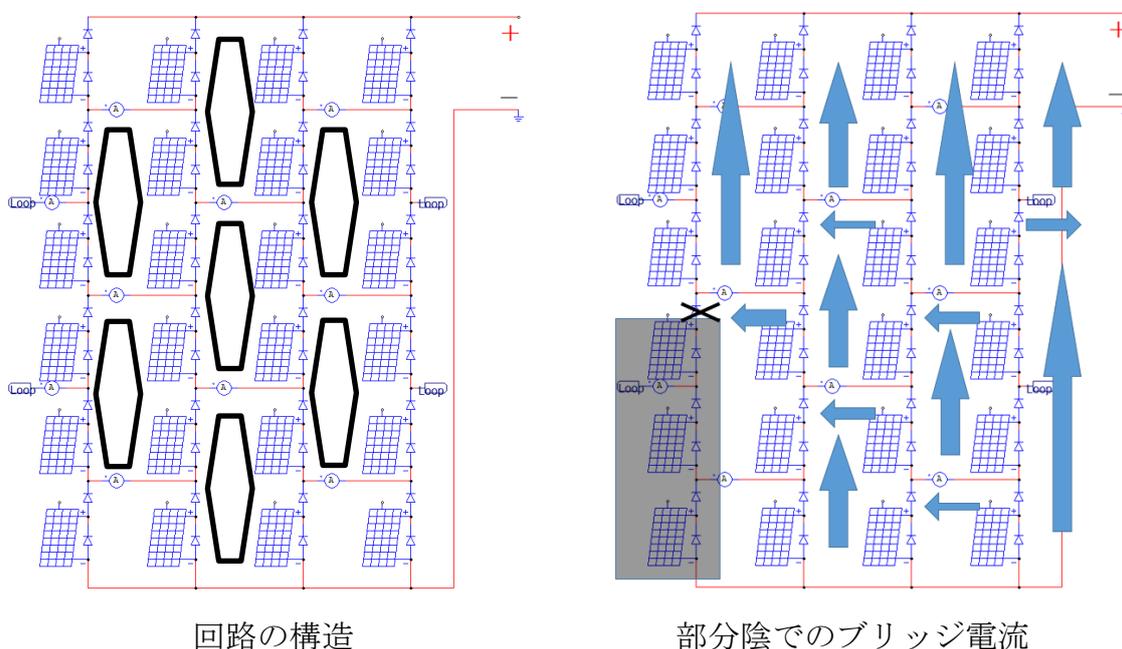


Fig.4-8 6S4P アレイ回路の蜂の巣分断法

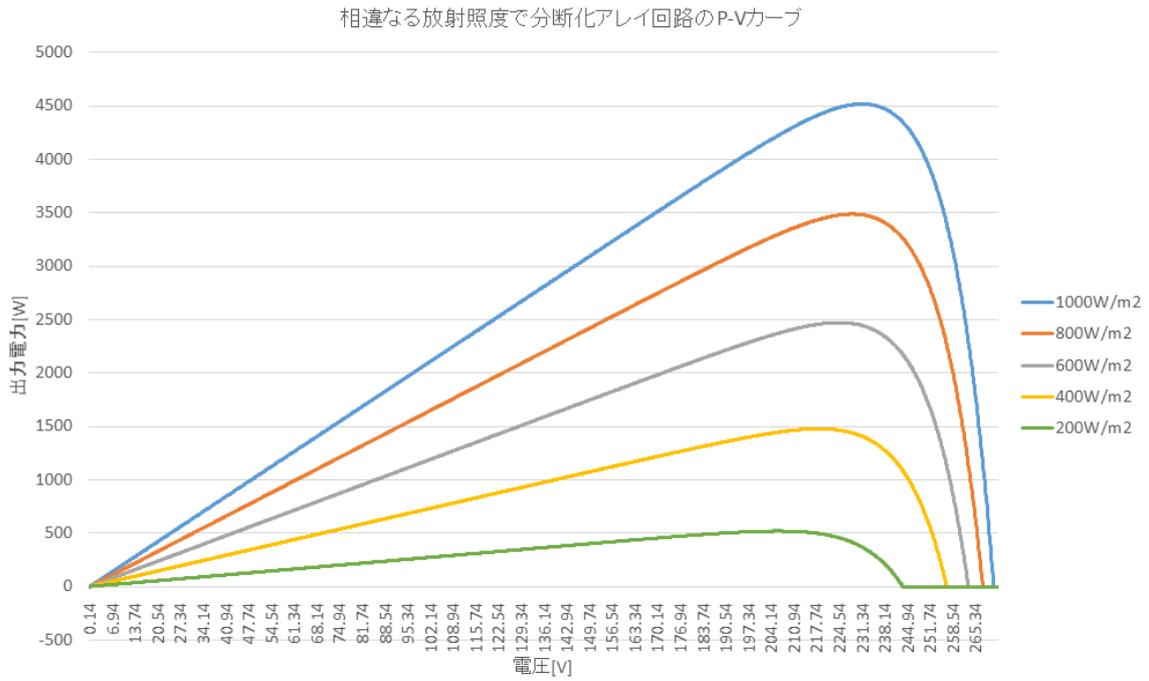
蜂の巣分断化は全分断化から発展されるものである。Fig.4-8 のように 4 枚のモジュールと 2 本のブリッジで蜂の巣のような六角形を構築する。メリットは再配分電流の量が低い。よって、アレイ回路内部の電気的な関係に対する影響が少ない。シンプルな構造でアレイ回路内部の安定性も良いと考える。デメリットはブリッジ電流の利用法は複雑になることである。

#### 4.1.2 分断化太陽電池アレイ回路の出力特性

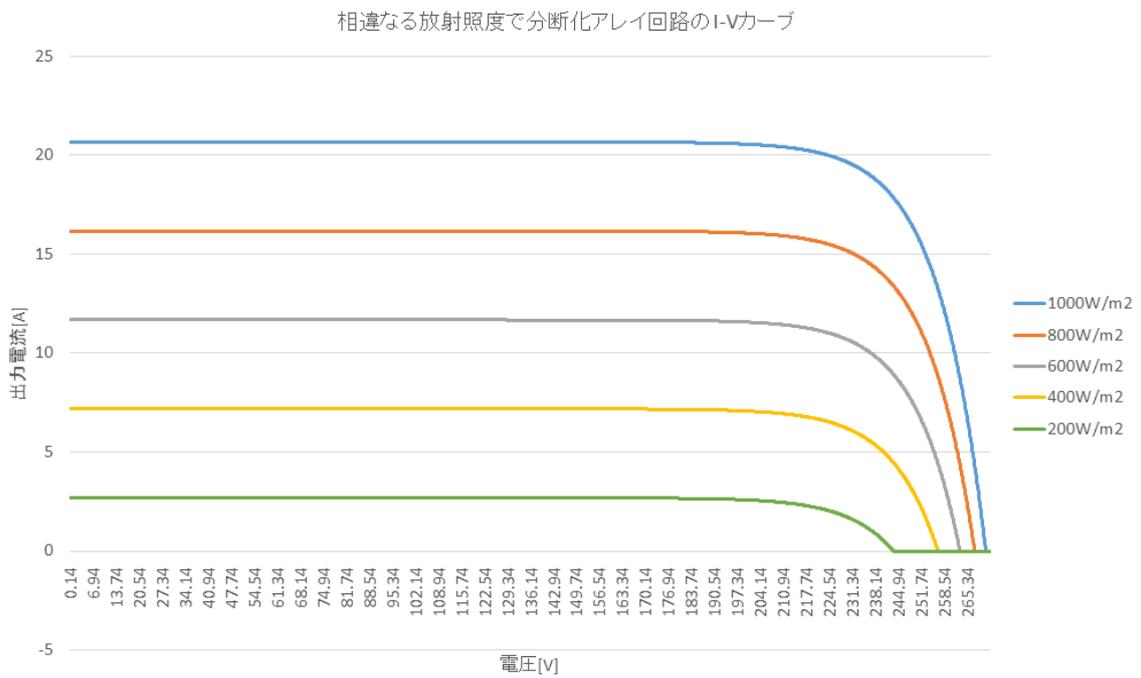
本節の各太陽電池モジュールの公称定格は Table.4-1 と同じである。太陽電池アレイ回路の構成について、陰なしの場合に前述の分断化手法での出力が全部同じはずであるため、6S4P アレイ回路二分の一分断法（循環ループなし）で出力特性をシミュレーションする。陰がある場合にそれぞれの特性をまとめる。

##### 4.1.2.1 部分陰がない場合の出力特性

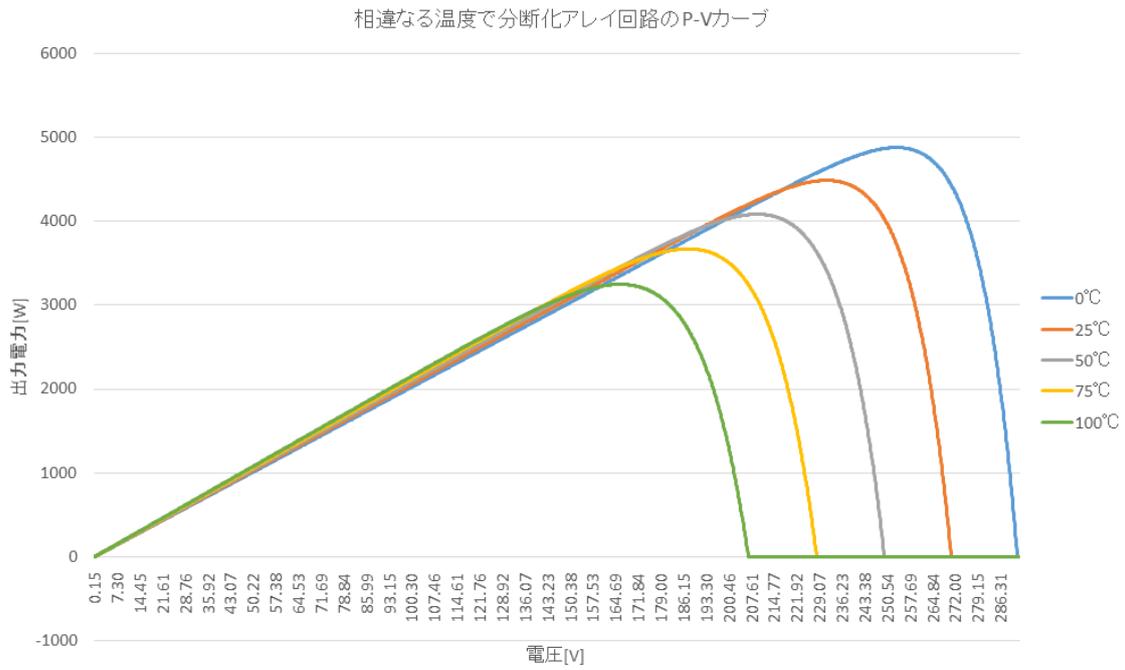
本節には部分陰なしの場合の 6S4P アレイ回路二分の一分断法（循環ループなし）が相異なる放射照度と温度での出力特性を Fig.4-9 に示す。



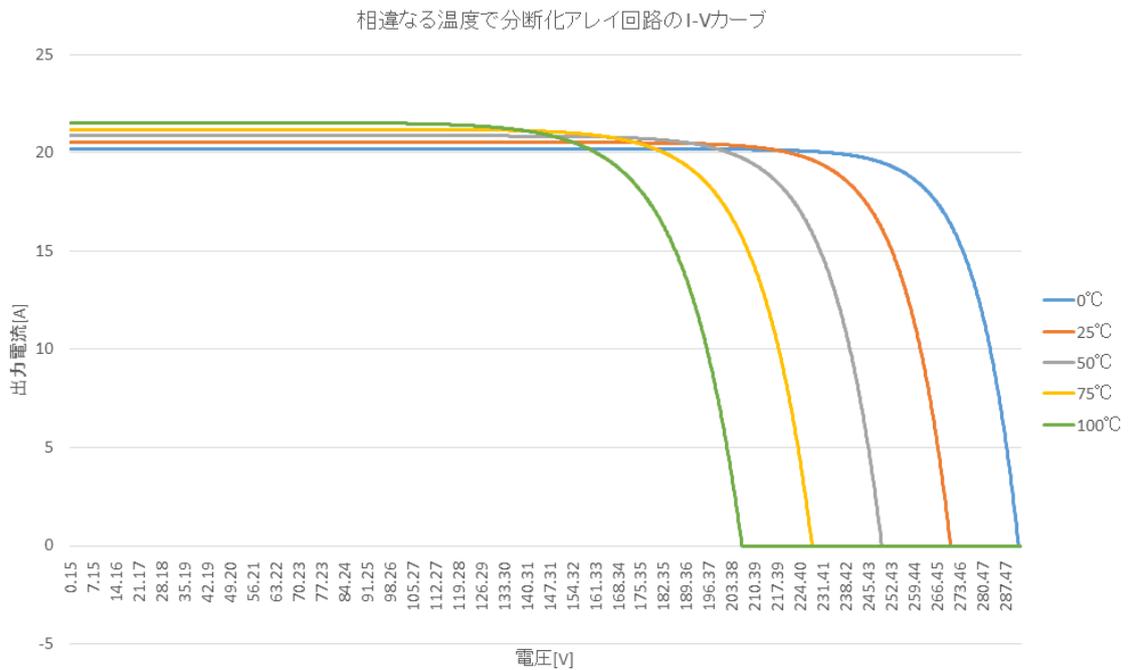
(a) 相異なる放射照度での分断化アレイ回路の P-V カーブ



(b) 相異なる放射照度での分断化アレイ回路の I-V カーブ



(c) 相異なる温度での分断化アレイ回路の P-V カーブ



(d) 相異なる温度での分断化アレイ回路の I-V カーブ

Fig.4-9 相異なる放射照度と温度での分断化アレイ回路の特性曲線

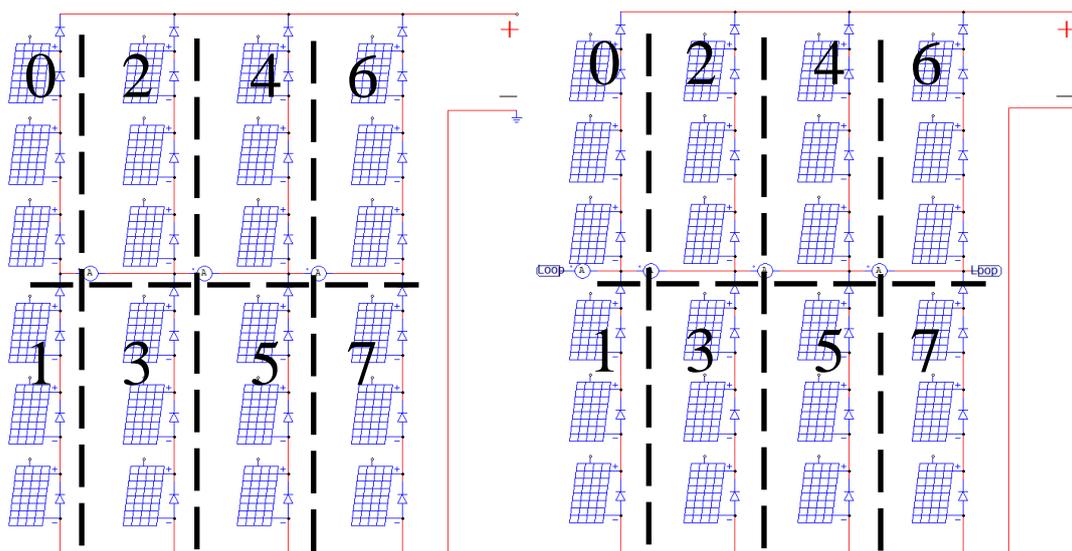
改良する前の通常アレイ回路の特性図 Fig.4-6 と比較すると、数値も曲線もほぼ同じである。すなわち、改造後の分断化アレイ回路と現在よく使われている通常アレイ回路は正常状態での出力が同じだと考えられる。

#### 4.1.2.2 部分陰がある場合の出力特性

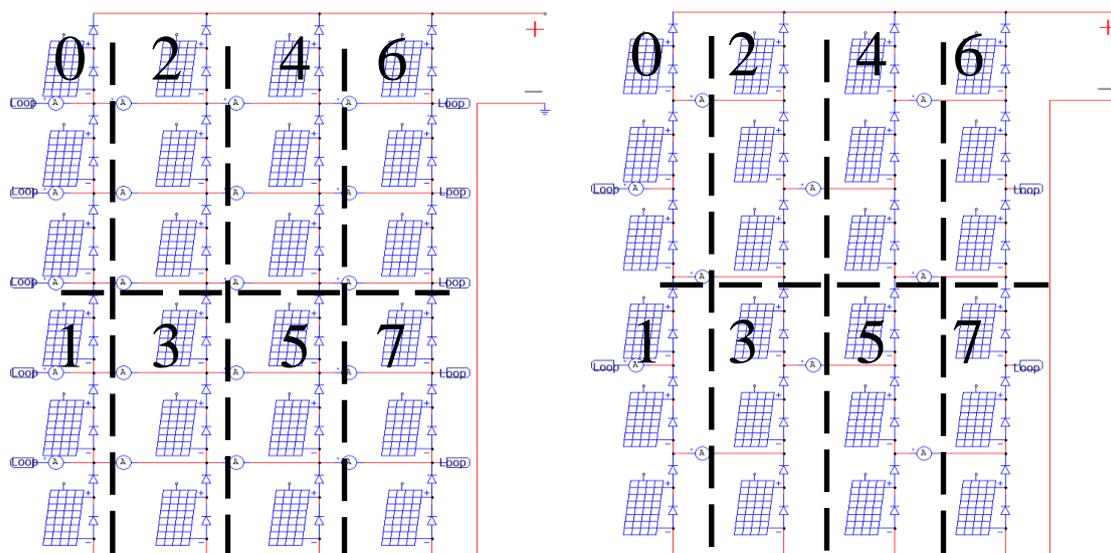
前述で 4 種類の分断法を検討したので、それぞれの分断化アレイ回路の出力特性を検討する。太陽電池アレイ回路を分割し番号をつける。分割は Fig.4-10 に示すようにする。

シミュレーションでは、放射照度を  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ・モジュール表面温度を  $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$  と設定する。陰がかかる場所の放射照度は元の  $15 \text{ [%]}$  ( $150 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ) まで下がる。

各分断手法及び番号付けは以下のようにする：



(a) 二分の一分断法（循環ループなし） (b) 二分の一分断法（循環ループあり）

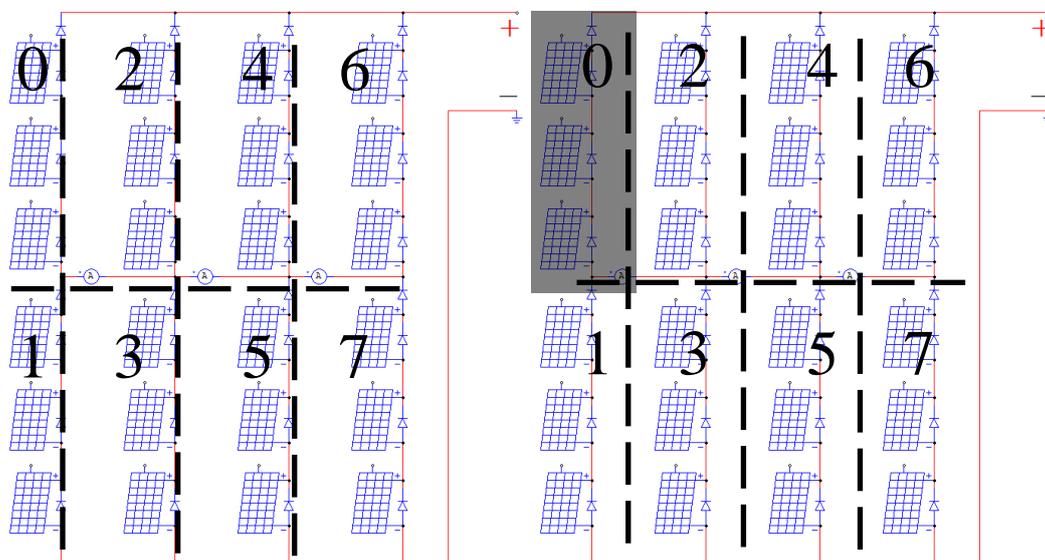


(c) 全分断法

(d) 蜂の巣分断法

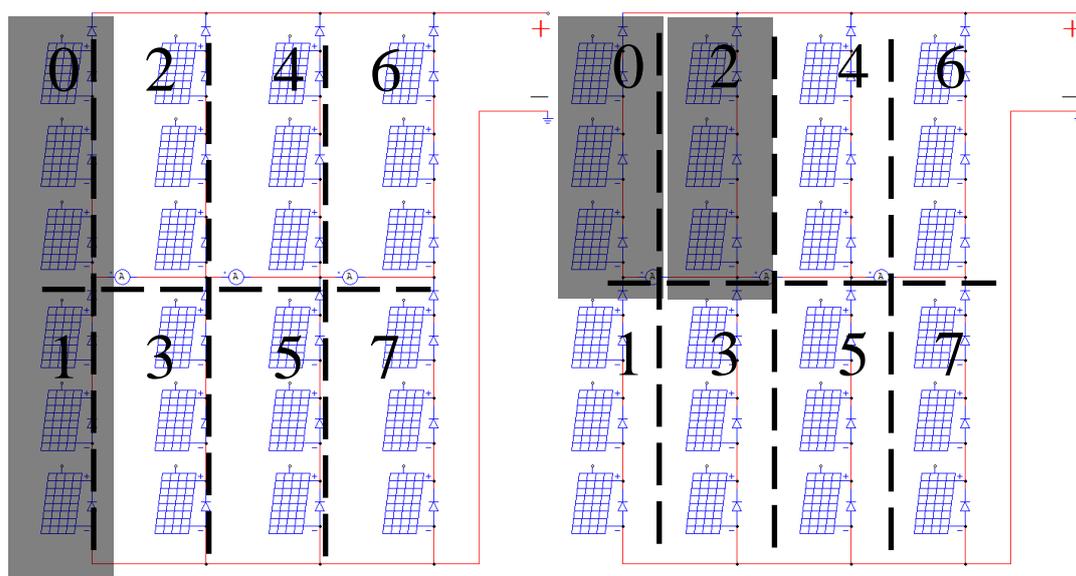
Fig.4-10 分断化アレイ回路の分割及び番号付き

部分陰の表記法は「陰なし-01-02-03」の番号順序である。各シミュレーションの結果をまとめる。ここで後半の01・02などは部分陰となっている部位を0～7のうちいずれかで示しており、同時に一部位の場合を「一位陰」、同時に二部位で部分陰となる場合を「二位陰」と呼ぶ。部分陰の発生手法は以下のようにする：



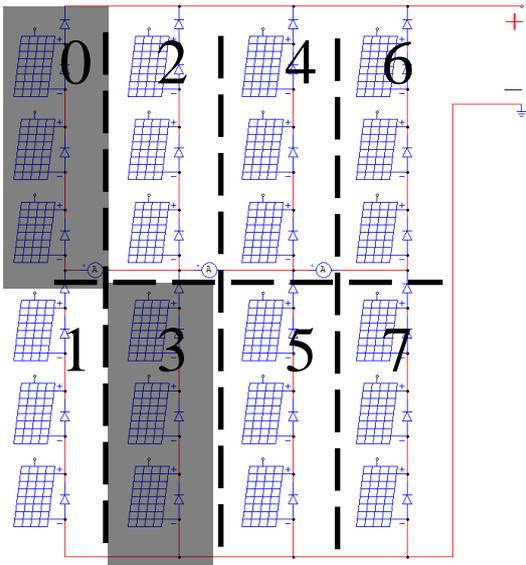
(a) 部分陰なし

(b) 一位陰 0



(c) 二位陰 01

(d) 二位陰 02

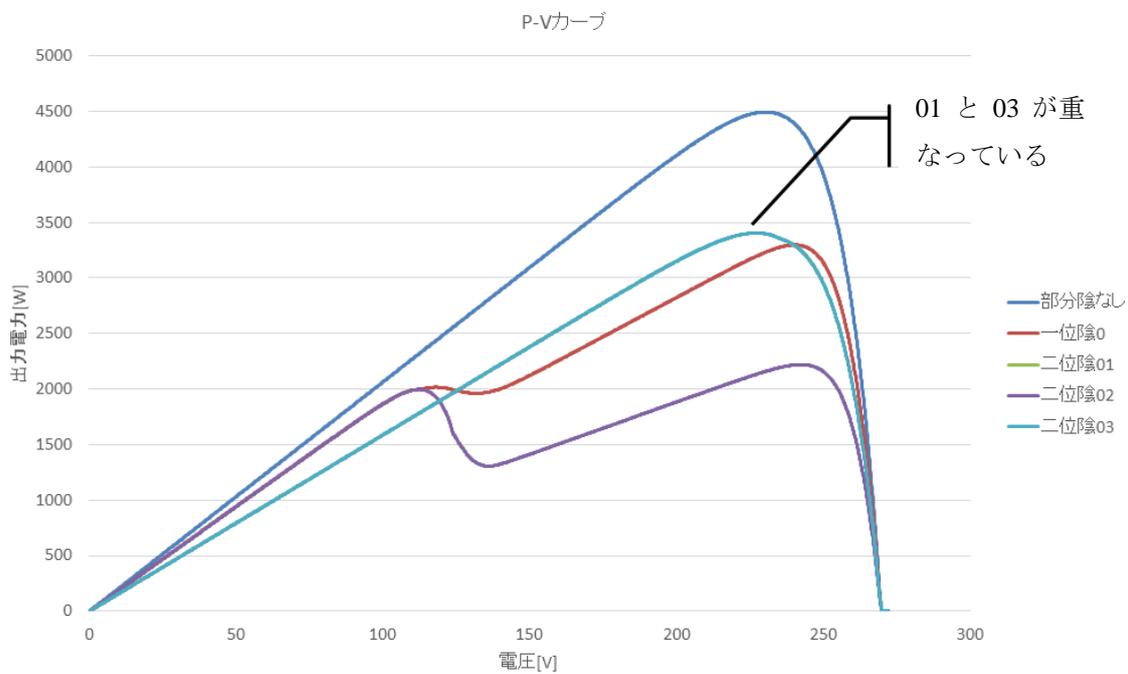


(e) 二位陰 03

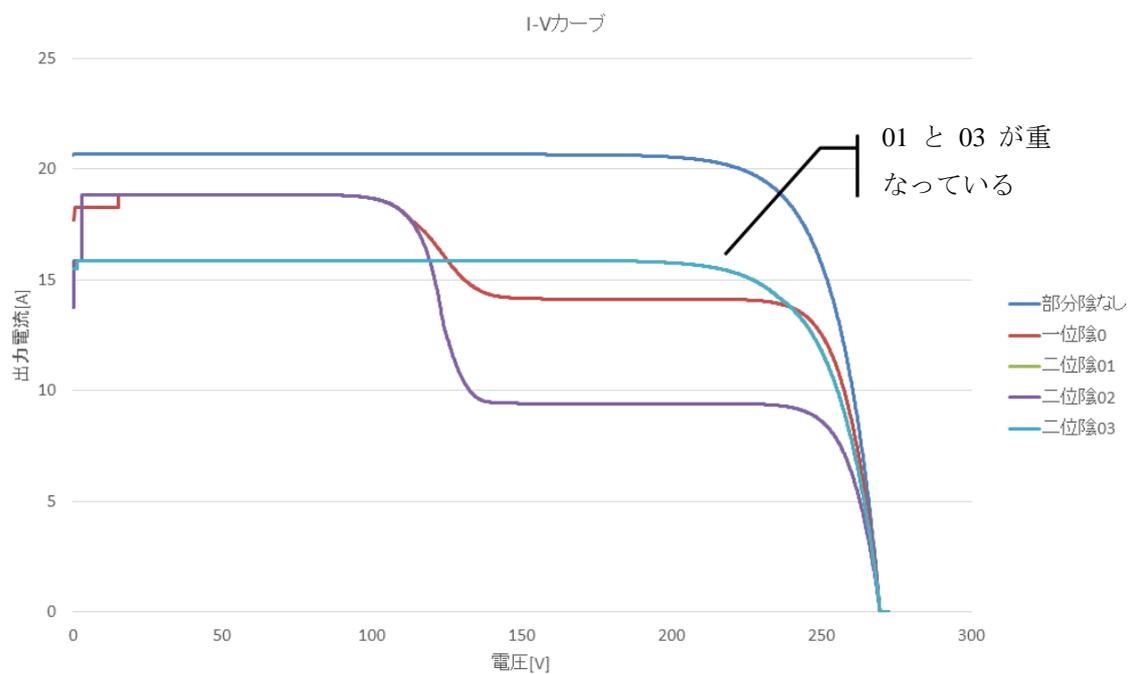
Fig.4-11 部分陰の発生手法

部分陰での各分断法の回路特性を以下の図に示す。

a. 二分の一分断法（循環ループなし）



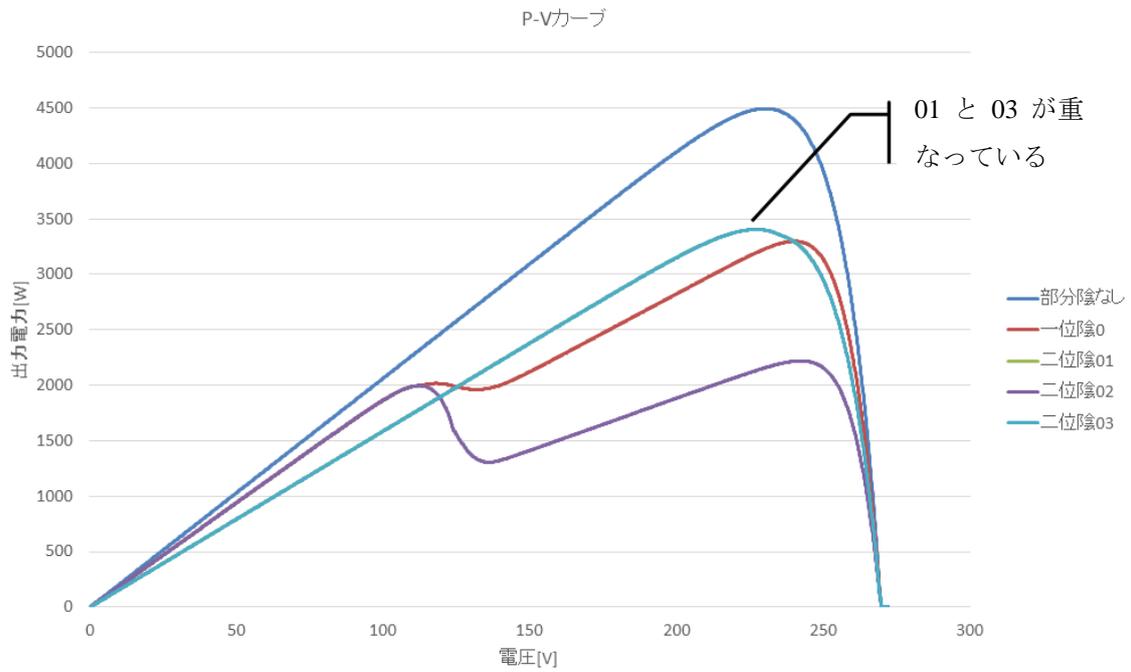
(a) P-V カーブ



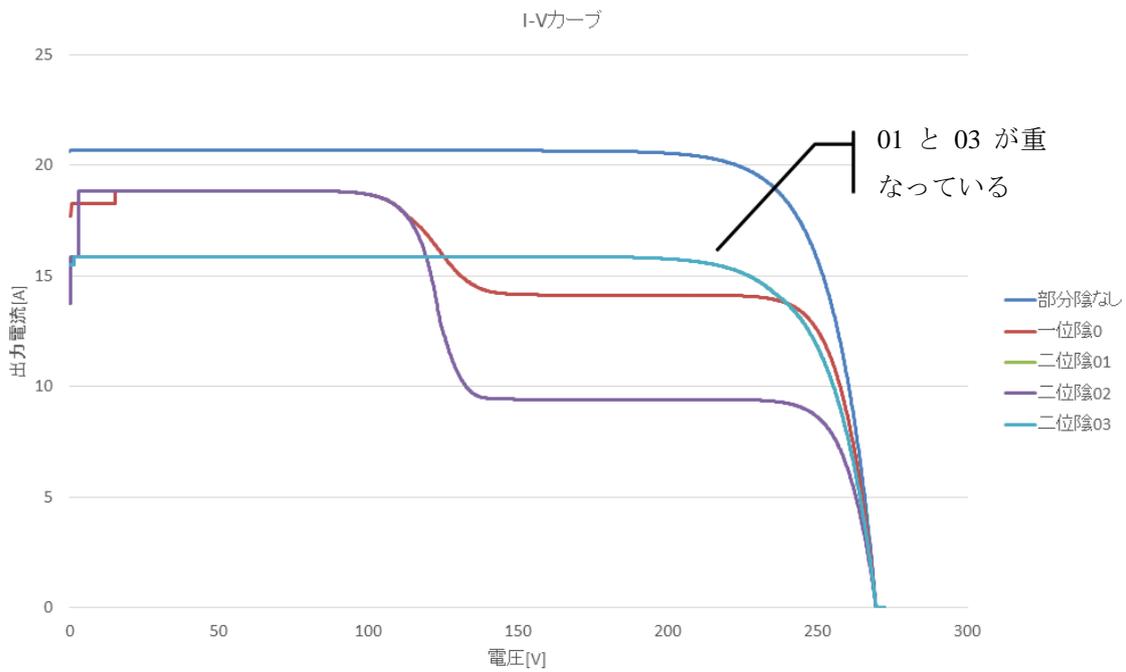
(b) I-V カーブ

Fig.4-12 「陰なし-0-01-02-03」の陰での回路特性

b.二分の一分断法（循環ループあり）



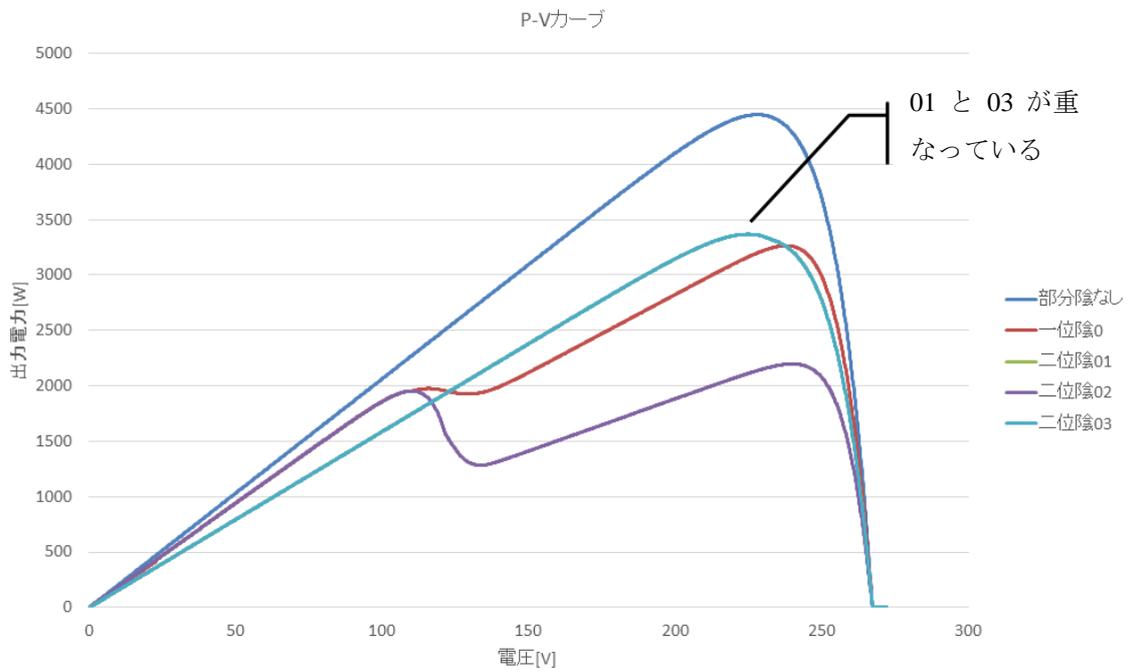
(a) P-V カーブ



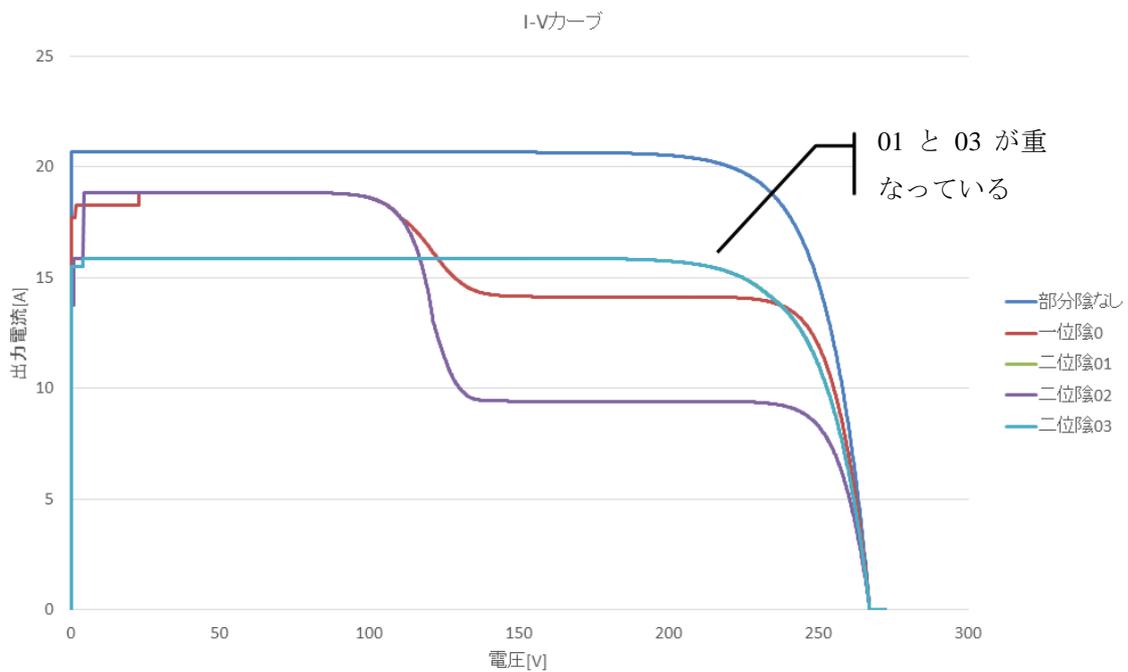
(b) I-V カーブ

Fig.4-13 「陰なし-0-01-02-03」の陰での回路特性

c.全分断法



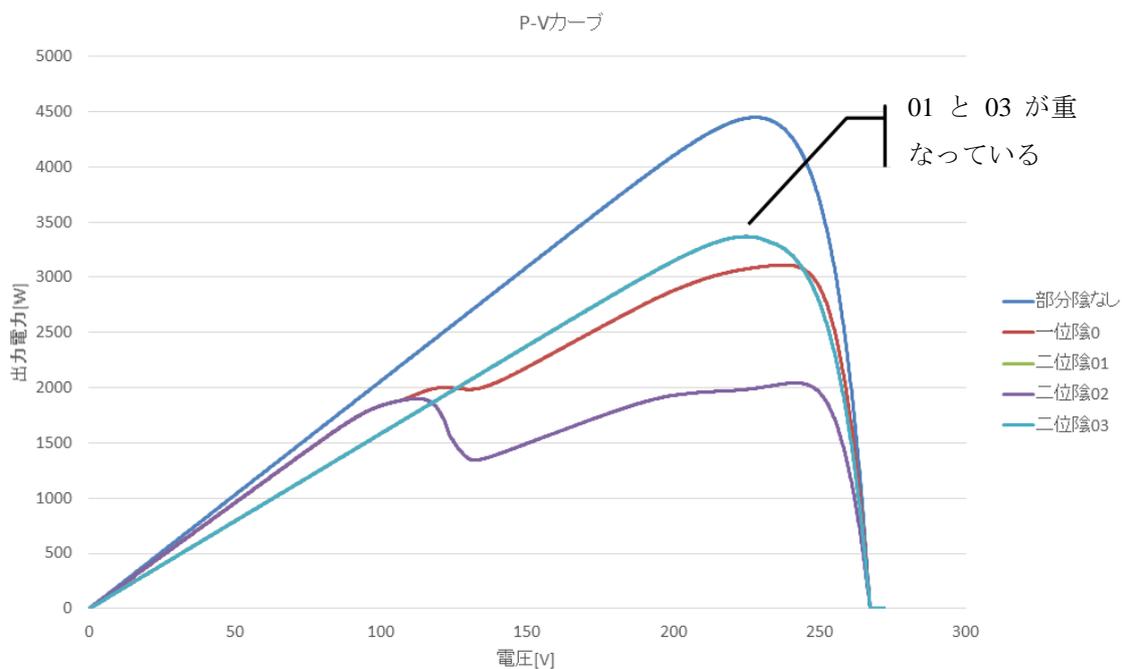
(a) P-V カーブ



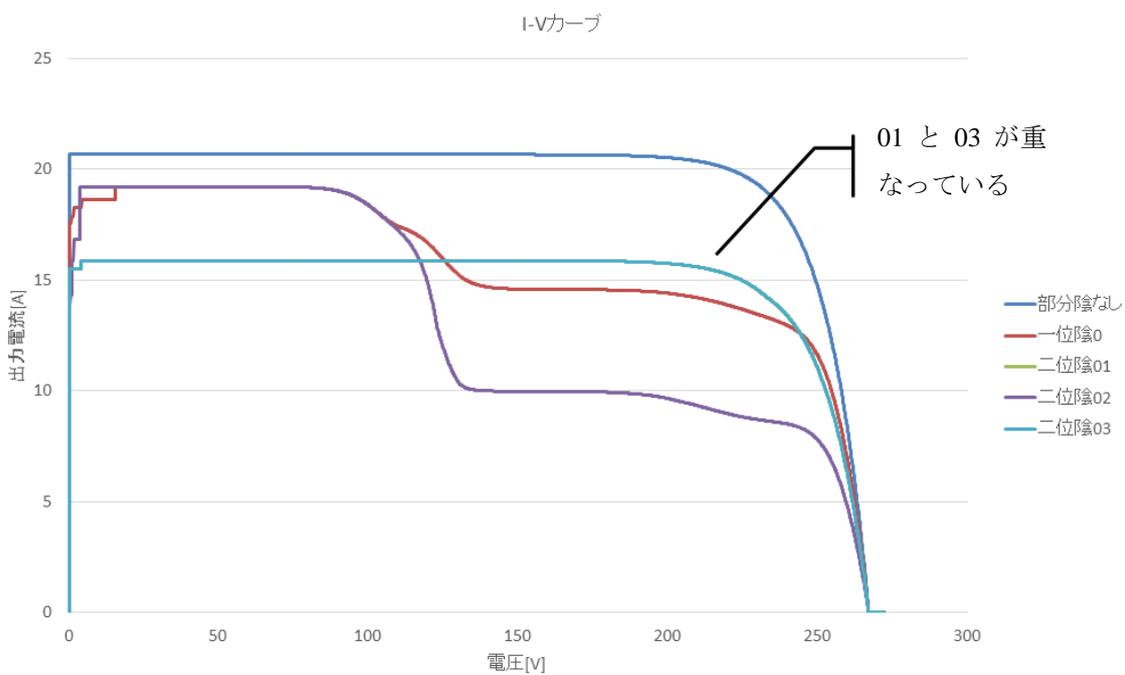
(b) I-V カーブ

Fig.4-14 「陰なし-0-01-02-03」の陰での回路特性

d.蜂の巣分断法



(a) P-V カーブ



(b) I-V カーブ

Fig.4-15 「陰なし-0-01-02-03」の陰での回路特性

以上の各分断法の特徴を Table.4-1 にまとめた：

Table.4-1(a) 多分断法での最大電力点をまとめた結果

最大電力点 [W]	部分陰なし	一位陰 0	二位陰 01 (Type III)	二位陰 02 (Type II)	二位陰 03 (Type I)
分断化なし	4505.34	3379	3413.42	2252.67	2252.67
二分の一分断 (循環ループなし)	4493.62	3297.72	3404.42	2219.54	3404.42
二分の一分断 (循環ループあり)	4493.62	3297.72	3404.42	2219.54	3404.42
全分断法	4446.75	3264.73	3368.42	2197.53	3368.42
蜂の巣分断法	4446.75	3110.55	3368.41	2042.3	3368.41

Table.4-1(b) 多分断法での最大電力点の電圧をまとめた結果

最大電力点での電圧 [V]	部分陰なし	一位陰 0	二位陰 01 (Type III)	二位陰 02 (Type II)	二位陰 03 (Type I)
分断化なし	230.79	230.79	227.66	230.79	230.79
二分の一分断 (循環ループなし)	230.25	240.04	226.98	242.22	226.98
二分の一分断 (循環ループあり)	230.25	240.04	226.98	242.22	226.98
全分断法	227.94	237.73	224.81	239.77	224.81
蜂の巣分断法	227.94	237.73	224.81	241.672	224.81

このデータより、分断化アレイ回路のほうが出力改善を達成した。特に二位陰 03 の場合に出力が大幅に改善された。行で比較すると分断化なしの二位陰 02 と 03 の出力が同じになった。この場合には 2 本のストリングの出力が失われる。分断化手法の効果は分断化なしの場合に 2 本のストリングの出力を全部失うところ 1 本で済むことである。その効果が本研究で検討する全四種類の手法で確認された。

なお、一位陰 0 と二位陰 02 での分断化アレイ回路では電圧が増加したものの、二位陰 03 の場合には少々低下した。著者はその原因がブリッジで分断したクラスタの出力電流再配分であると考え。その再配分の際に生じた短絡ブリッジを流れている電流はブリッジ電流という。

#### 4.1.3 ブリッジ電流

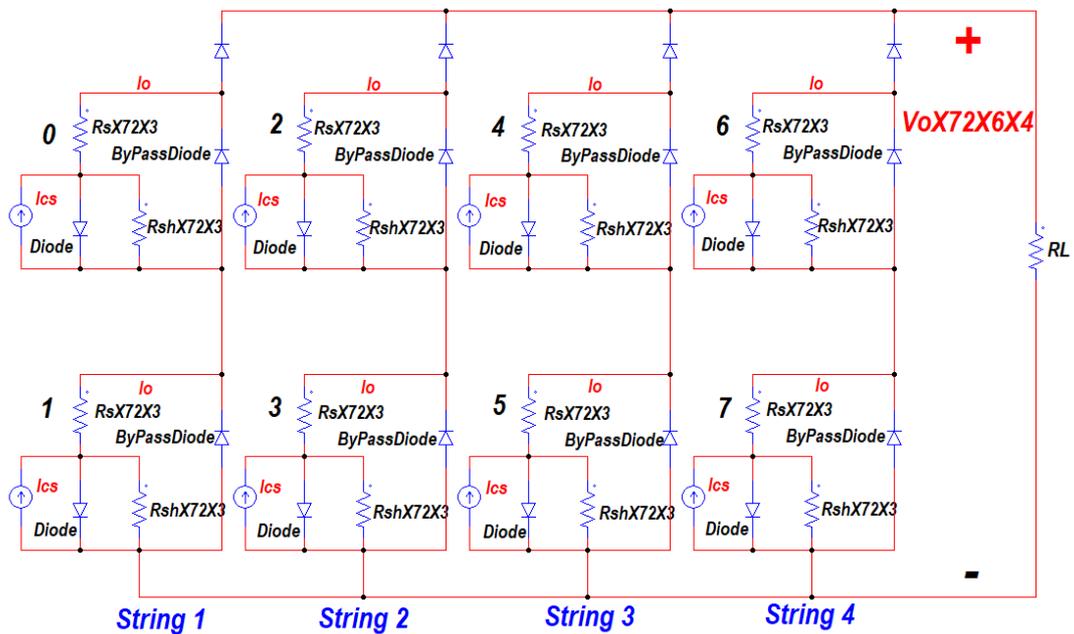
ブリッジ電流とはアレイ回路内部の電流が再配分する際に分断化アレイ回路の短絡ブリッジに生じる電流である。

アレイ回路にある各モジュールが通常状態かつ部分陰が発生しない場合には

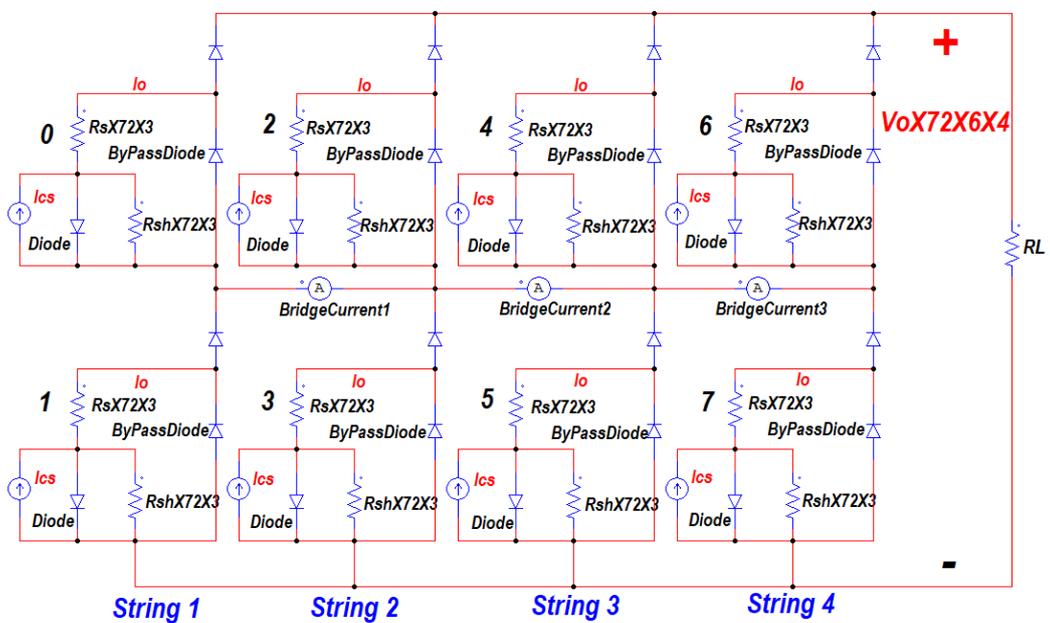
再配分が発生しない故にブリッジ電流もほぼ 0 [A]のはずである。それに、電流の再配分が発生するとブリッジ電流が生じ、その電流には方向と大きさがあるので、それらをデータとして使用すれば、色々な機能が実現できると考える。

#### 4.1.3.1 ブリッジ電流の機構

太陽電池の数値モデルでブリッジ電流の機構を解析する。



(a)通常アレイ回路の数値モデル



(b)分断化アレイ回路の数値モデル

Fig.4-16 ブリッジ電流の仕組みの解析用数値モデル

#### a.部分陰での通常アレイ回路の動き

Fig.4-16(a)に示す通常アレイ回路の位置0に陰がかかったものと仮定すると、位置0に3枚のモジュールの $I_{cs}$ が減少する。そして、位置1の $I_{cs}$ は位置0の $I_{cs}$ より大きいので、余分の電流はバイパスダイオードに流れる。その時に当該ストリング対負荷 $R_L$ の電流と電圧が同時に低下するものの、他のストリングの電流と電圧は通常の通りに出力している。よって、アレイ回路全体の電圧は高い状態であり、そのストリングの逆流防止ダイオードが導通できない。その場合、最大電力を得るためには、アレイ電圧を昇圧回路の動作で下げることしかできない。結果として、P-Vカーブには多峰性が生じ、MPPT制御の動作は最大電力点に近づくためにアレイ電圧を下げるように動く。

#### b.部分陰での分断化アレイ回路の動き

部分陰が Fig.4-16(b)に示す分断化アレイ回路に及ぼす影響は以下の通りである。上記と同じく位置0の $I_{cs}$ が減少し、位置0の逆流防止ダイオードが導通できなくなる。分断化回路のブリッジがあると、位置0の部分の出力を捨て、位置1357の電流をブリッジで再配分して位置246に流れ続けられることが可能となる。

この再配分が行われることには二つの前提が必要である。一つは直列接続された複数の電流源の総電流は最小の電流源により決まることである。もう一つは付録にある Fig.F1-4のように、式(F1-2)と(F1-3)の余分の電流が太陽電池モデルの等価ダイオードに流れ、電圧の上昇効果が出ることである。この二つの前提より、再配分過程を以下のように説明する：

1. 部分陰が Fig.4-16(b)の上方の位置0に発生する。
2. 上方の位置0246の電流通路が狭くなるので、下方の位置1357の電流が上方に全部に流れることはできない。電流の大部分はブリッジを渡り上方に流れ続ける。余った電流は等価ダイオードに流れる。ここで、ダイオードの特性より電流が大量に流れると、順電圧が上昇するので、下方の位置1357の電圧は上昇する。I-Vカーブでは動作点が右に移動し、出力電流が低下、出力電圧が上昇する。
3. 上方の位置0246の0は部分陰が存在しているため電流が大幅に低下する。残った位置246に流れる電流は式(F1-5)で決まる。ブリッジに渡った電流は式(F1-1)の $I_{sc0}$ ・式(F1-2)の $V_d$ 及び位置246の電流通路の広さに均等に決まる。
4. 上方の位置246に電流が大量に流れるため、内部等価ダイオードに流れる電流 $I_d$ が減少し、そのため電圧も低下する。I-Vカーブでは動作点が左に移動し、出力電流が上昇、出力電圧が降下する。
5. 前述のように、下方の位置1357の電圧上昇とともに、上方の位置0246

の電圧は低下することで、アレイの出力電圧は少々変わる。ただし、MPPT制御の電圧変動幅は小さくなる。

6. まとめて、部分陰での電流減少が原因になって、電流と電圧の再配分が生じる。そして、この再配分は動的バランスを満足するので、最後にバランス点に到着し、安定になる。

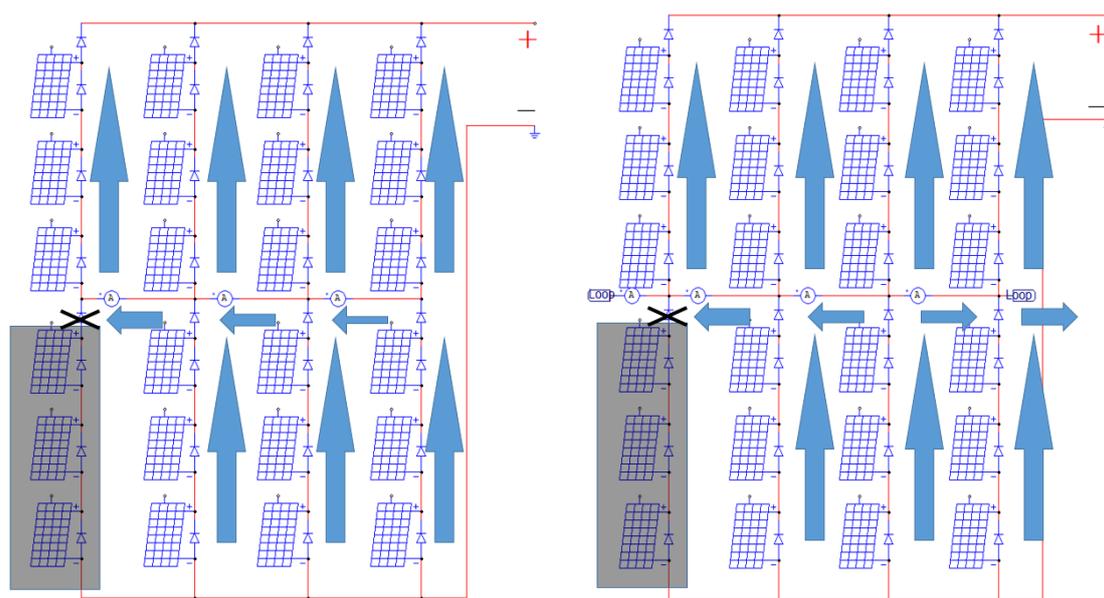
結果としての部分陰影響がある場所以外の逆流防止ダイオードが導通できるため、アレイ回路の電圧をMPPT制御動作で変動しなくても最大電力点が維持できる。

#### 4.1.3.2 ブリッジ電流の様子

分断化手法が4つあるので、位置番号の定義を Fig.4-11 に示すとおりとする。

部分陰の陰数は部分陰が同時に 0~7 の番号を何個かけていることを意味する。本文には一位陰・二位陰や零・一・二位陰などの単語がある。一位陰の意味は Fig.4-11 に示された八個の場所の任意な 1 個だけに陰がかかることである。同じく二位陰の意味は八個の場所の任意な 2 個のみに陰がかかることである。そして、零・一・二位陰は部分陰なし・一位陰・二位陰ランダムに発生することを意味する。

本節では一位陰の様子だけを検討する。



(a) 二分の一分断法（循環ループなし） (b) 二分の一分断法（循環ループあり）

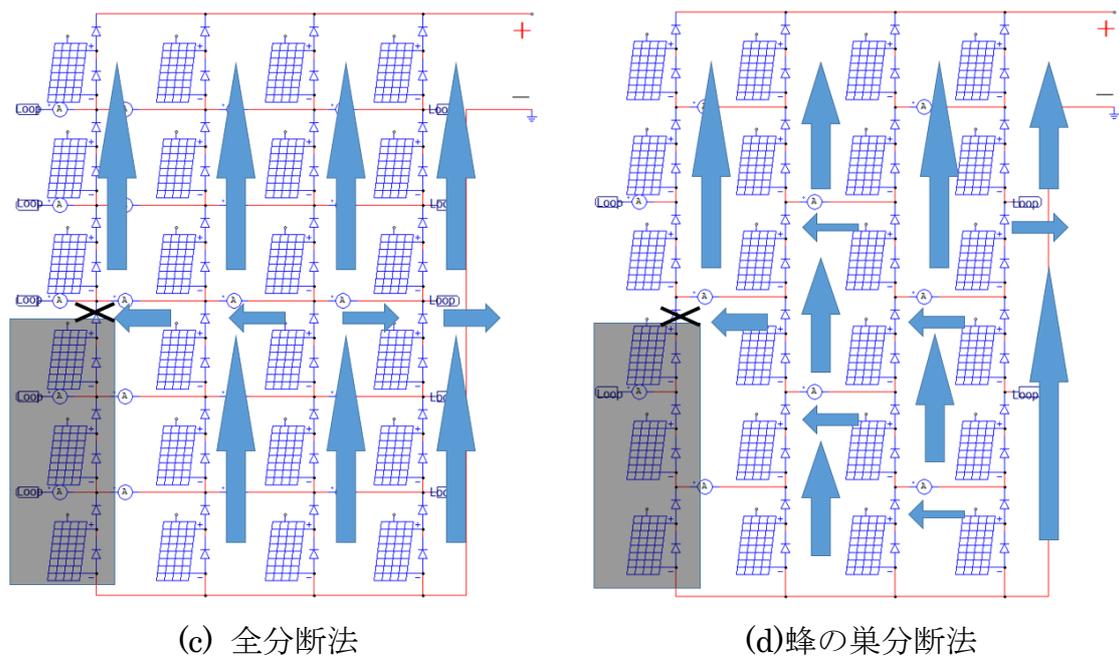


Fig.4-17 一位陰でのブリッジ電流

Fig.4-17 より、電流の再配分及びブリッジ電流方向を示した。特に横向き電流の大きさ(矢印の太さ)を表記し、その方向と大きさで陰の位置が判定できる。判定手法を 4.3 節で検討する。

#### 4.1.4 分断化手法の実験検証

##### 4.1.4.1 実験条件及び用具

太陽電池モジュール：8 枚，型番と特性を以下の表にまとめる

Table.4-2 実験用太陽電池モジュールの公称定格

製造者	KIS 社
型番	GT833S-TF
公称最大出力	7 [W]
公称開放電圧	21.1 [V]
公称最大出力電圧	17.2 [V]
公称短絡電流	0.45 [A]
公称最大出力動作電流	0.41 [A]

太陽電池アレイ回路構成：2S4P

光源：自作 LED アレイ光源

出力能力：300~350 [W/m<sup>2</sup>]

サイズ：910×600 [mm]，A1

この光源についての紹介は付録第 2 章にまとめた。

光源から太陽電池モジュールまでの間隔：500 [mm]

負荷装置：Takasago FK-200L2

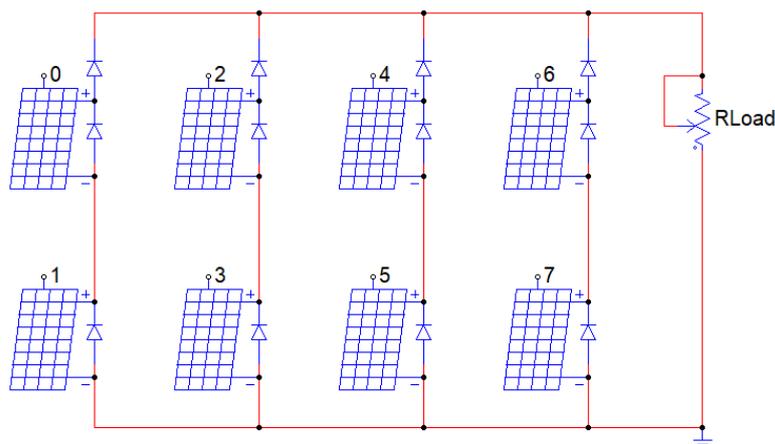
この装置で手動 MPPT を行った。

部分陰の作り方：6 枚の A4 コピー紙（白）を重ねて各モジュールに置いた。

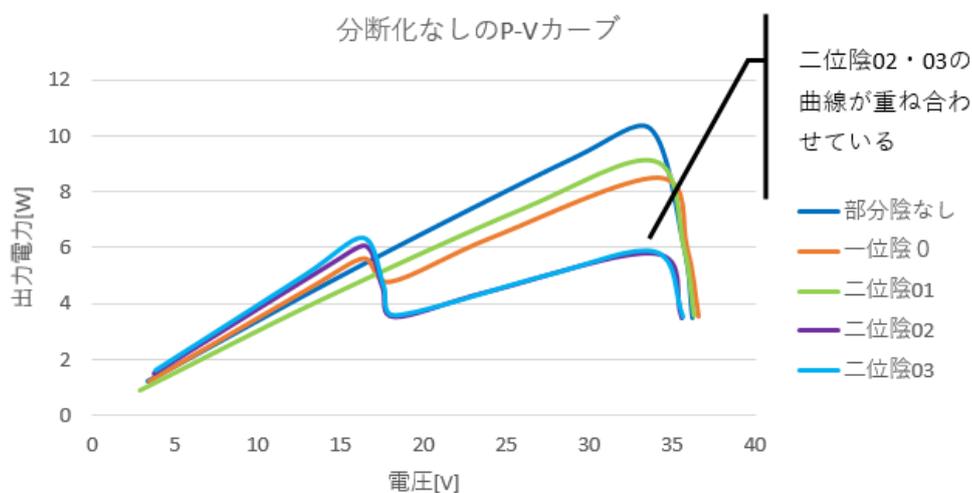
前述した通り，部分陰の放射照度が全天日射の 15%と決めた。しかし，実験時モジュールに到着する放射照度が 300～350 [W/m<sup>2</sup>]の分布しかないので，掛け算すると陰にかかった部分の放射照度が 60 [W/m<sup>2</sup>]になる。この程度の照度はそもそも発電できない量であるので，6 枚の A4 コピー紙で完全に光を遮断することで実験した。

#### 4.1.4.2 分断化なしの回路及び特性

実験回路が以下のように示されている。陰の発生方法は Fig.4-11 に示されている。実験は太陽電池モジュールの表面温度は約 48℃に安定してから行った。



(a) 分断化なしの実験回路



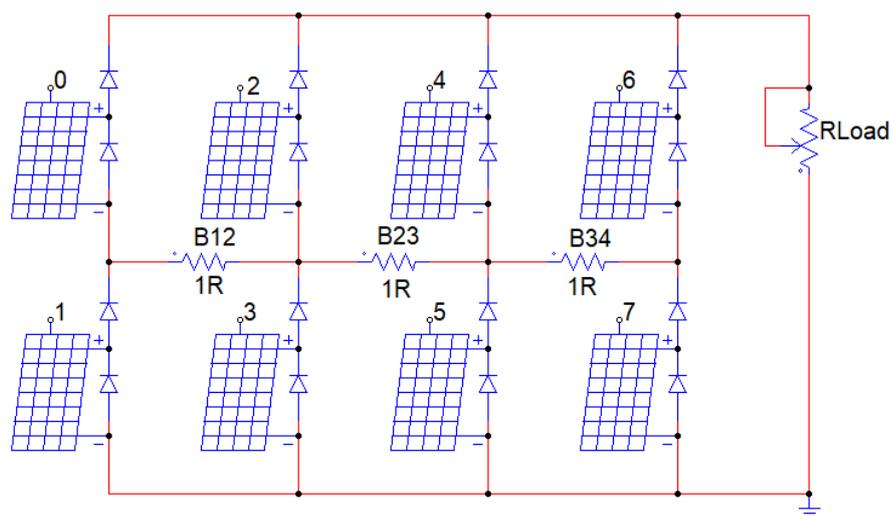
(b)測定した P-V カーブ

Fig.4-18 分断化なしの実験回路及び特性

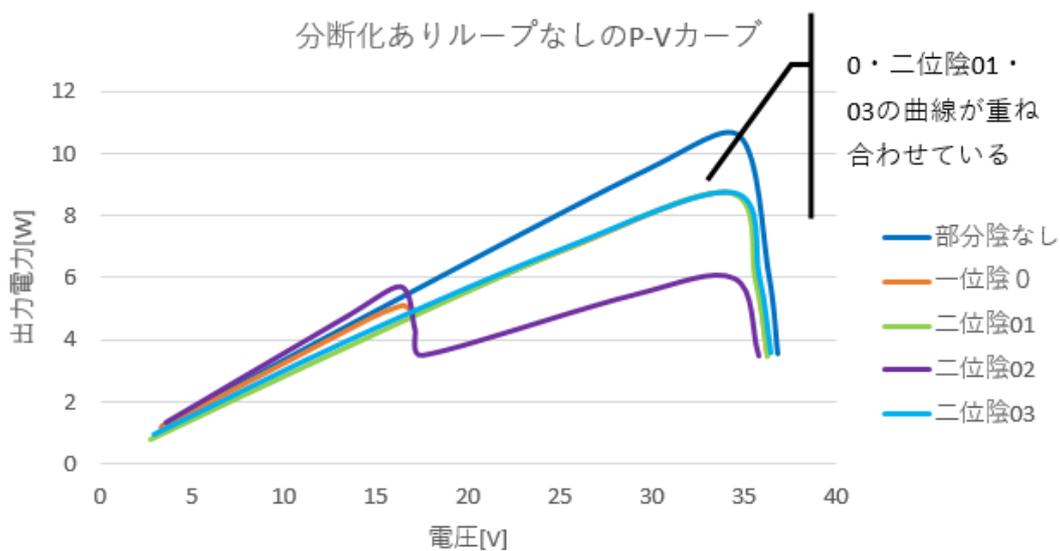
Fig.4-18 より、二位陰 02 と 03 では同じ特性を有するといえる。その原因は 2 本のストリングの出力を失ったことである。

#### 4.1.4.3 二分の一分断法（循環ループなし）の回路及び特性

実験回路が以下のように示されている。陰の発生方法は Fig.4-11 に示されている。実験時の太陽電池モジュールの表面温度は約 47°C に安定してからとした。



(a) 二分の一分断法（循環ループなし）の実験回路



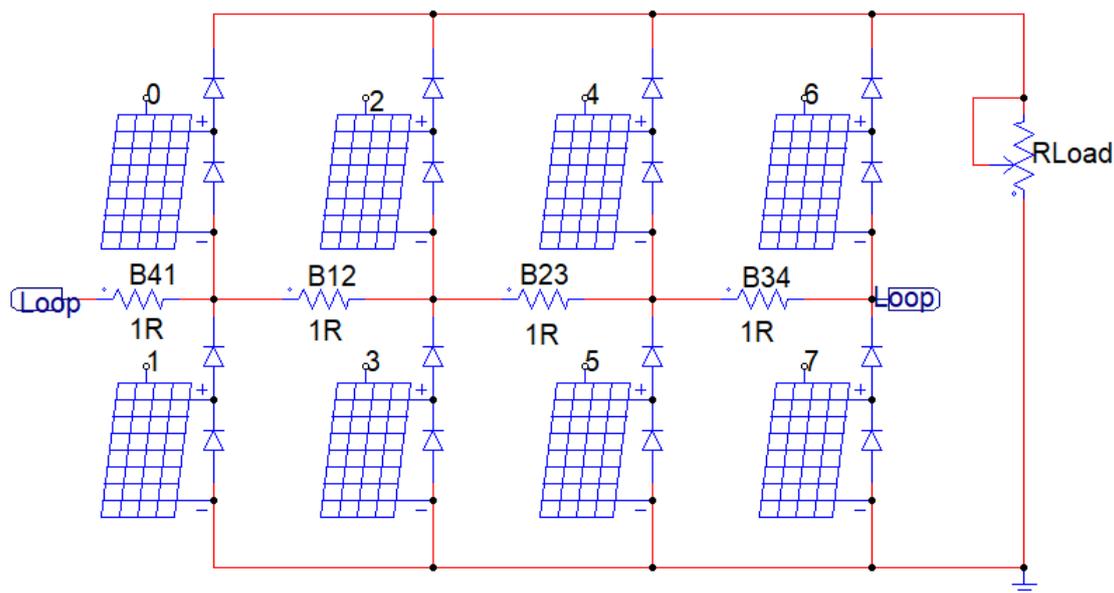
(b)測定した P-V カーブ

Fig.4-19 二分の一分断法（循環ループなし）の実験回路及び特性

Fig.4-19(b)と Fig.4-18(b)と比較すると、二位陰 03 の結果が異なり、明らかに Fig.4-19(b)の出力が多かった。

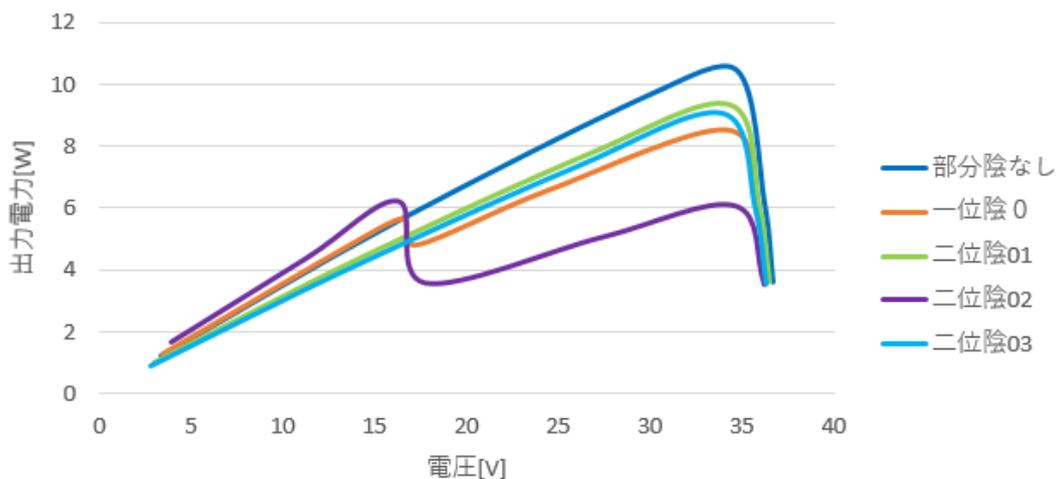
#### 4.1.4.4 二分の一分断法（循環ループあり）の回路及び特性

実験回路が以下のように示す。陰の発生方法は Fig.4-11 に示されている。太陽電池モジュールの表面温度は約 48°C に安定してから実験する。



(a) 二分の一分断法（循環ループなし）の実験回路

分断化ありループありのP-Vカーブ



(b)測定した P-V カーブ

Fig.4-20 二分の一分断法（循環ループあり）の実験回路及び特性

Fig.4-20(b)の結果は 18(b)・19(b)より更に向上したことを確認した。その原因はループありの場合に両端部のストリングの抵抗がバランスをよく取ったことである。するとブリッジ電流が流れやすくなり、出力電力がより一層獲得できた。

#### 4.1.4.5 実験データの比較検討

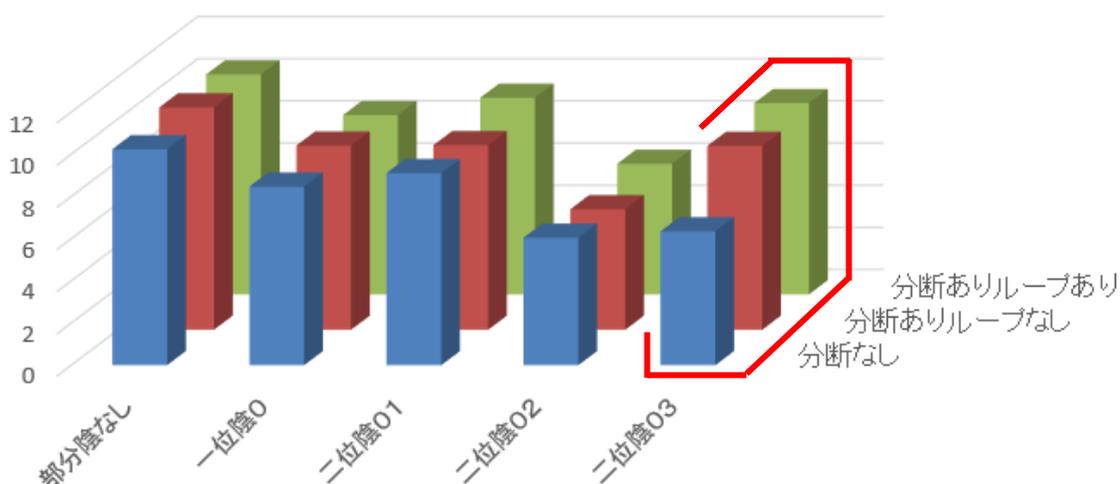


Fig.4-21 最大電力点の比較

比較検討として分断化するアレイ回路の出力が改善された。特に二位陰 03 の場合の出力改善が著しかった。

一方、ブリッジにループを追加した場合に出力電力がループなしの場合より向上したことを確認した。

#### 4.1.5 各分断手法のコスト

想定上に普通のブリッジ 1 個を設けるために短絡ブリッジ用電力配線 3 [m]・信号配線 15 [m]・逆流防止ダイオード 1 個が同時に必要である。ループ用ブリッジ 1 個を設けるために短絡ブリッジ用電力配線 10 [m]・信号配線 15 [m]・逆流防止ダイオード 1 個が同時に必要である。想定上に直流電流計は市販の品を使用する。その電流計の出力は直流電流であるので、信号配線でパワコンディショナーに集電・変換・検出する。従ってパワコンディショナーの内部に精度が比較的良い ADC 変換器を増設しないといけない。それは電流検出装置という。更に 1 個の電流計は 1 個の ADC を接続するので、電流検出装置のコストは ADC の数次第に高価になる可能性がある。

以上に述べた各分断手法の設置・追加する場合に発生するコストを以下の表にまとめる。

Table.4-3 短絡ブリッジを設けるためのコスト

	直流電流計	逆流防止ダイオード	電力配線	信号配線	電流検出装置 ADC
	個	個	1 芯, [m]	2 芯, [m]	個
二分の一分断 (ループなし)	3	4	9	45	3
二分の一分断 (ループあり)	4	4	19	60	4
全分断法	20	20	95	300	20
蜂の巣分断法	10	20	44	150	10

Table.4-3 より、分断法が複雑になると、設けるためのコストは電流計の倍数に増加していることがわかった。配線が長くなって、施工時に手間が余計にかかると考える。

#### 4.1.6 信頼度評価

Table.4-3 より、分断化改造では配線とダイオードを大量に追加する。すると改造後の太陽電池アレイ回路の信頼度を評価しないと行けない。前述の通りの発電システム (6S4P) で構成した場合に、分断法の違いによって信頼度がどのように異なるかを評価する。評価基準は「JIS Z 8115 ディペンダビリティ (信頼性) 用語 MIL-HDBK-217F Notice 2 (Reliability Prediction of Electronic Equipment)」に基づいて行う。

本論文では検討する発電システムの信頼度を主に左右するのは半導体部品であると考えられる。ただし、太陽電池本体は大面積の接合を含んでいるため電子回路部品としての信頼度は高い。ここで問題になるのはガラス表面における熱的外乱や天候影響などの機械的要因であるが、これは設置状況に極めて敏感に依存して変化するので、本論文が扱う電気工学的要因とは異なる。従って本検討では、電気工学的な意味合いで最も信頼度を左右する主要要因である電池本体を除くダイオードに注目した。Table.4-3 にまとめる逆流ダイオードには常に電流が流れていて、時々ストリング一本の逆電圧を耐える事がある。更に放熱設計が比較的弱く、室外利用での温度差が広い。

上記規格において一般用アナログダイオードの部品故障率 (FIT: Failure In Time) は

$$\lambda_p = \lambda_b \times \lambda_T \times \lambda_S \times \lambda_C \times \lambda_Q \times \lambda_E \dots \dots \dots (4-1)$$

( $\lambda_b$ : 基本故障率,  $\lambda_T$ : 温度ファクタ,  $\lambda_S$ : 電圧ストレスファクタ,  $\lambda_C$ : コンタクタ構造ファクタ,  $\lambda_Q$ : 品質ファクタ,  $\lambda_E$ : 環境ファクタ)

で評価すると規定されている。半導体メーカーの ROHM 社のダイオード信頼度データで試算すると各ファクタは以下のようにまとめる：

基本故障率 $\lambda_b$ ：一般用アナログダイオード， $\lambda_b = 0.0038$

温度ファクタ $\lambda_T$ ：動作時接合部温度 80 [°C]で， $\lambda_T = 5.0$

電圧ストレスファクタ $\lambda_S$ ：定格電圧 1000 [V]，動作電圧約 400 [°C]で，負荷率 40%とすると， $\lambda_S = 0.11$

コンタクタ構造ファクタ $\lambda_C$ ：非金属接合とスプリング負荷接続， $\lambda_C = 2.0$

品質ファクタ $\lambda_Q$ ：中位の JAN 品質， $\lambda_Q = 2.4$

環境ファクタ $\lambda_E$ ：地上・固定使用， $\lambda_E = 6.0$

以上のファクタで計算する部品故障率 (FIT) は

$$\begin{aligned}\lambda_p &= \lambda_b \times \lambda_T \times \lambda_S \times \lambda_C \times \lambda_Q \times \lambda_E \\ &= 0.0038 \times 5.0 \times 0.11 \times 2.0 \times 2.4 \times 6.0 \div 10^7 \\ &= 6.02 \times 10^{-9} = 6.02FIT \dots\dots\dots (4-2)\end{aligned}$$

故障に関する統計的情報がない場合に規格で定められている計算法に従うと、部品点数 N の場合のシステムとしての総合 FIT 値は N 個の部品それぞれの FIT 値を合計して MTTF (修理が入る場合には MTBF) を算定、使用年数との比から故障確率を評価する。本ケースでは全てのダイオードの信頼性 (FIT 値) が等しいものと仮定すれば、分断化なしの場合・二分の一分断法の場合と全分断法あるいは蜂の巣分断の場合でそれぞれ次のように計算できる。

分断なし：ダイオード使用数：28 個

故障率=6.02FIT×28 よって MTTF=1 / (6.02×28×10<sup>-9</sup>)

使用年数を 10 年として、故障率= 87600 /MTTF = 0.0148=1.48%

二分の一分断法：ダイオード使用数：32 個

故障率=6.02FIT×32 よって MTTF=1 / (6.02×32×10<sup>-9</sup>)

使用年数を 10 年として、故障率= 87600 /MTTF = 0.0169=1.69%

全分断および蜂の巣分断法：ダイオード使用数：48 個

故障率=6.02FIT×48 よって MTTF=1 / (6.02×48×10<sup>-9</sup>)

使用年数を 10 年として、故障率= 87600 /MTTF = 0.0253=2.53%

第 3 章の目的に記述した信頼度に対する目標「10 年間の運転時間に対して故障率 2%未満」で判定すると、全分断および蜂の巣分断法の予測故障率が 2%を超えるので、採用は慎重にしたほうが良いと考える。

#### 4.1.7 分断化手法の結論

二分の一分断法では一部分の出力を捨てアレイの電圧を維持し、アレイ回路内部の電流再配分で出力改善するのが分断化アレイ回路のメリットである。最大電力点での出力電圧は多峰性が出て、最大電力点が変わらないのでほぼ電圧にも変化がない。出力電力について、部分陰 03 の場合に分断化なしより向上することを確認した。更に設けるためのコストは比較的安く、施工時の手間も省ける。新設配線や設備の量が少なく、比較的信頼性が高いと考えられる。従って、Table.4-1 と Table.4-3 の結果で総合的な判断及び 4.1.6 節の信頼度予測の計算結果より、本研究では二分の一分断を注目し、シミュレーション・実験をメインに行うべきであると判断し、全分断法と蜂の巣分断法についての細かい検討を今後の課題とする。

なお、ブリッジ電流の様子は部分陰の位置と関係があるので、これを利用し、機能開発をまた後節に述べる。

## 4.2 MPPT 付定電圧制御昇圧回路

前章より、従来の開ループ昇圧回路及びその数値モデルについて述べた。さらに前節の内容に分析した通常アレイ回路と分断化アレイ回路の特性より、部分陰での通常アレイ回路での最大電力点は部分陰なしの時より左に移動する一方、分断化アレイ回路の場合に右に移動することが分かった。よって、部分陰発生時の分断化アレイ回路の MPPT 制御手法はアレイ電圧を逆に少々上げる特性を利用し、以下のように改良できる。

### 4.2.1 開ループ昇圧回路から閉ループへ

式(F1-12)は開ループ昇圧回路の伝達関数である。昇圧率と MPPT 制御を両立させるために閉ループ化する。伝達関数に基づき、定電圧制御を用い、改良した昇圧回路のブロック線図は Fig.4-22 のようになる。

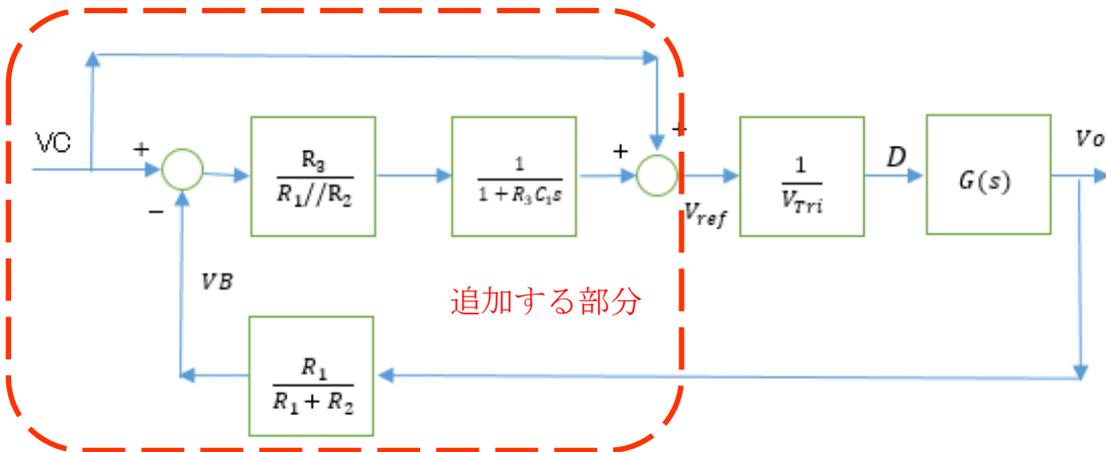


Fig.4-22 設計した閉ループ昇圧回路のブロック線図

$G(s)$ は従来の昇圧回路の伝達関数で、その回路の入力  $D$  は変調波  $V_{ref}$  と搬送波  $V_{tri}$  で比較して発生するものである。MPPT アルゴリズムの機構は変調波を上下に調整していることである。欠点として、その昇圧回路の出力電圧が制御できないので、直流母線及びインバータの交流出力に支障が出る可能性がある。

よって、出力電圧を安定化する部分を追加した。指定される電圧  $VC$  と実際のコンバーター出力電圧と比較して ( $VC-VB$  のところ)、単極点追従回路 ( $\frac{R_3}{R_1 // R_2}$

と  $\frac{1}{1 + R_3 C_1 s}$ ) で新たな  $V_{ref}$  を発生し、昇圧回路の出力を安定化する。このブロック

線図より、Fig.4-23 のようなフィードバック回路が作れる。

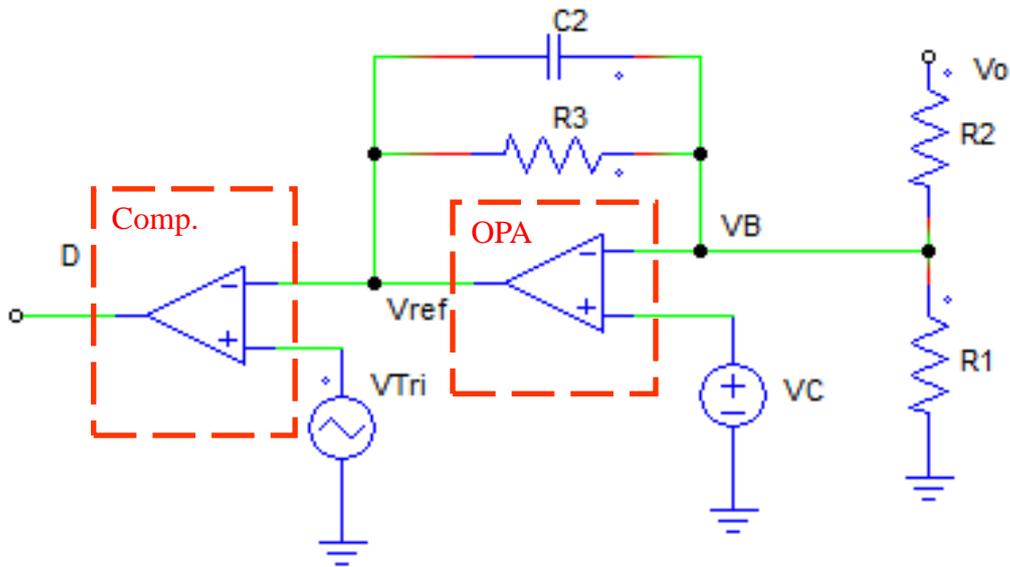


Fig.4-23 定電圧制御のフィードバック回路

Fig.4-23 にはオペアンプと比較器がある。中央のオペアンプは単極点レギュレーターで、左側の比較器は PWM 波を生じる比較回路である。この回路と Fig.F1-14 の開ループ昇圧回路とを接続すると、Fig.4-24 のような定電圧制御化した昇圧回路が得られる。「定電圧制御昇圧回路」と略称する。

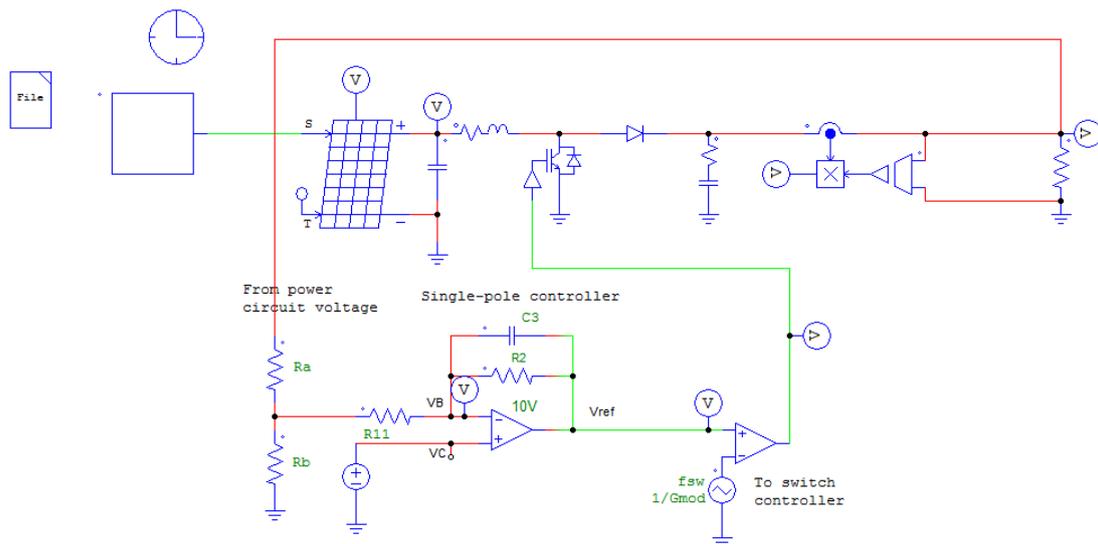


Fig.4-24 単極点レギュレーター定電圧制御昇圧回路

#### 4.2.2 MPPT アルゴリズムの導入

前節では Fig.4-24 の定電圧制御昇圧回路に基づき、MPPT 制御アルゴリズムを導入する。一般的にMPPT制御を行う時、瞬時電力データが必要のため、Fig.4-24 回路を Fig.4-25 のように改造する。

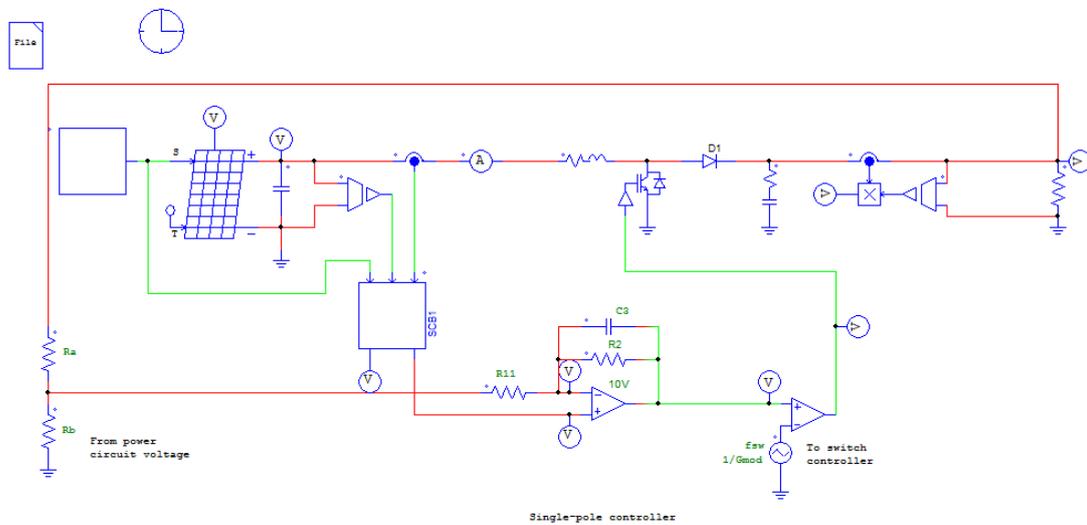


Fig.4-25 MPPT 付定電圧制御昇圧回路

#### 4.2.3 一枚太陽電池モジュールから太陽電池アレイ回路へ

以上の改良案には一枚の太陽電池モジュールしか含まれていない。実際の太陽光発電システムに適用するために太陽電池アレイ回路と接続しなければならない。できた回路を Fig.4-26 と Fig.4-27 に示す。

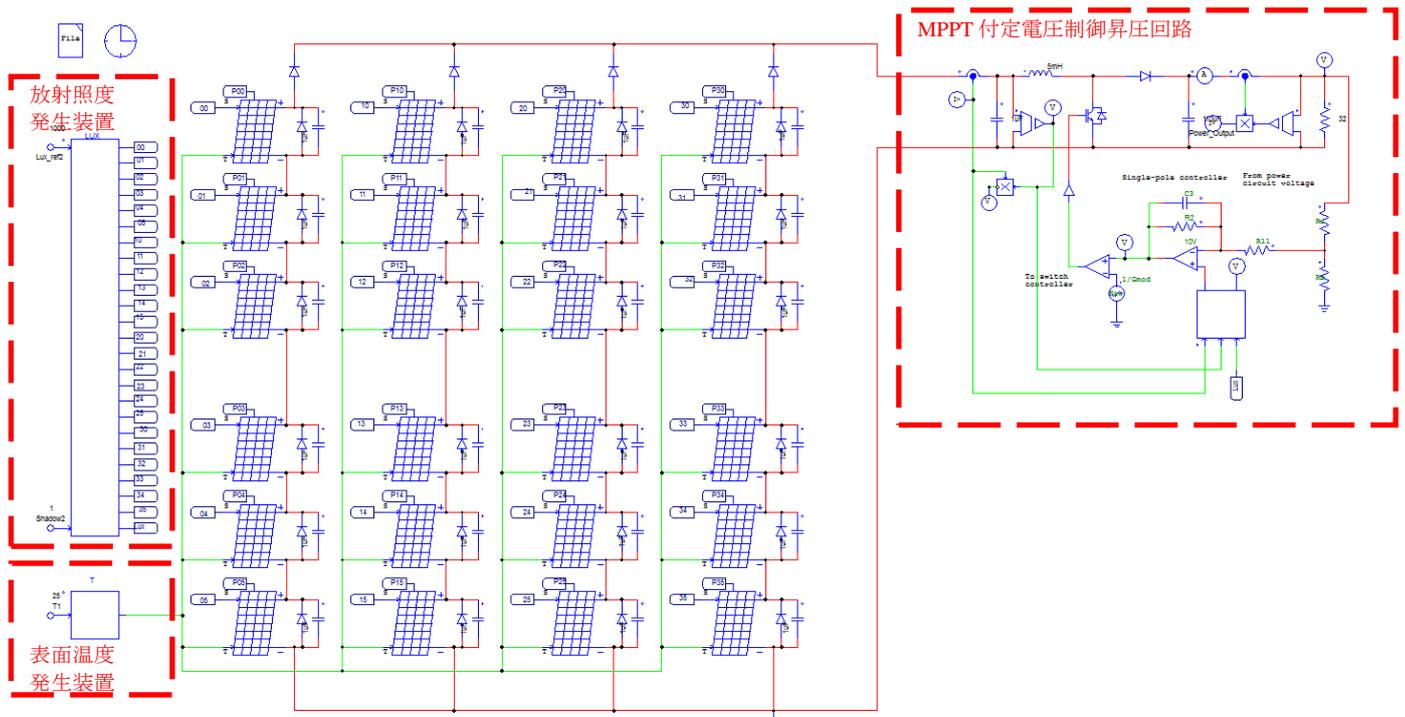


Fig.4-26 通常アレイ回路と MPPT 付定電圧制御昇圧回路との接続

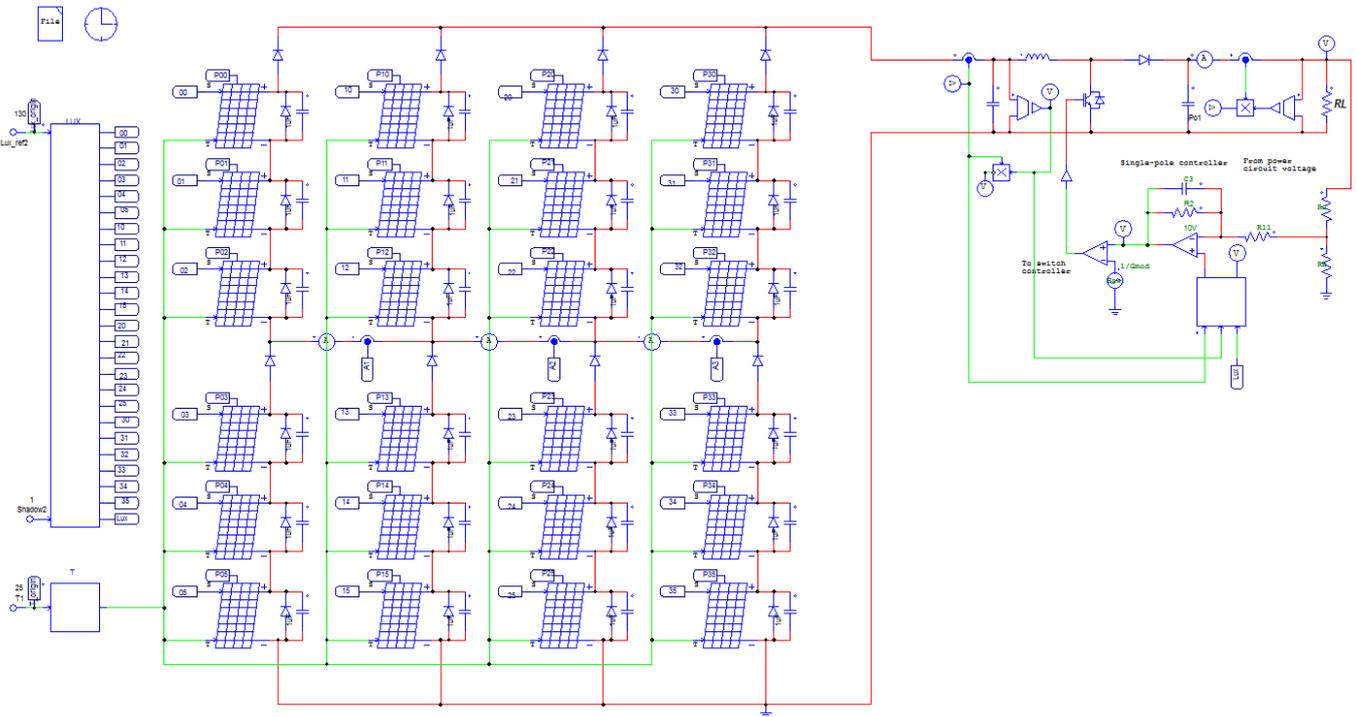


Fig.4-27 分断化アレイ回路と MPPT 付定電圧制御昇圧回路との接続

本論文では 4 種類の分断法を紹介した。それぞれをシミュレーションする場合にアレイ回路を入れ替えればうまくできる。同時にブリッジに接地された電流計でブリッジ電流を測定する。

#### 4.2.4 MPPT 付定電圧制御昇圧回路に対するシミュレーション

##### 4.2.4.1 シミュレーション用ソフトウェア

回路図の描画や数値シミュレーションは Powersim 社の PSIM を用いて行う。

PSIM はパワーエレクトロニクス及びモータ制御のために開発されたシミュレーション・パッケージである。PSIM は高速シミュレーション，使いやすいユーザインタフェース，波形解析機能などにより，パワーエレクトロニクスの解析・制御系設計・モータドライブの研究などに優れたシミュレーション環境を提供する[5-2]。PSIM 中のシミュレーションアルゴリズムは台形則統合による節点解析である。これは，電力系統の過渡現象を解くための計算手法の先駆的研究である H. Dommel 博士の EMTP で用いられている手法と共通している[5-3]。

##### 4.2.4.2 シミュレーション条件

数値シミュレーションには，PSIM に内蔵している 24 枚の太陽電池物理モデルを利用している。太陽電池物理モデル[5-4]は PSIM の標準モデルで，放射照度とモジュール温度を入力として変化させるとアレイ及び昇圧回路の出力がどのような変化するかがシミュレーションできる。

環境パラメータとして，モジュール温度を 25 [°C]，放射照度を 100～1000 [W/m<sup>2</sup>]の範囲に二種類の変化パターンで提案回路の性能を検証する。一つは放射照度を 1000 [W/m<sup>2</sup>]から 100 [W/m<sup>2</sup>]毎に低下することである。もう一つは 1000 [W/m<sup>2</sup>]→ 100 [W/m<sup>2</sup>]→ 900 [W/m<sup>2</sup>]→ 200 [W/m<sup>2</sup>]→…のような極めて振動的な変化である。

シミュレーションの計算時間刻みは 0.5 [μsec]で，すべてのダイオードは理想的なダイオードとしており，順電圧は 0 [V]と設定した。

シミュレーション結果のうち，電力の図には Theoretical Power (理論電力) 出力という曲線があるが，それは太陽電池アレイ回路が陰なしかつ変化している放射照度での理論的な最大出力である。最大出力の計算方法は太陽電池セルの数値モデルを利用することである。一定の放射照度とモジュール表面温度 25 [°C]を入力し，セルの出力電圧  $V_o$  を 0～0.8 [V]の範囲内で変化した時の最大電力点を最大セル出力とした。その後アレイ回路のセル数（本研究の例として，セル数 = 24 枚モジュール数 × 72 個セル = 総計セル数 1728 個）とすでに求めた最大セル出力を掛け算して得た数値である。

##### 4.2.4.3 MPPT 付定電圧制御昇圧回路

従来の開ループ昇圧回路の性能と本研究で改良した閉ループの定電圧制御昇圧回路との比較を検討する。

シミュレーションの時間長は 1 [sec]である。提案昇圧回路の性能をテストす

るために、太陽電池アレイ回路の放射照度が段階的に減少するケースと減衰振動的にステップ状の増減が起きるケースとする。なお、MPPT アルゴリズムの山登り法（P&O 法、以下 P&O 法と呼ぶ）と増分コンダクタンス法（INC 法、以下 INC 法と呼ぶ）も同時に比較する。

以下の各数値に注目して検討した：

電圧：昇圧回路の入出力の電圧の差を開き、更に倍率を安定させる。

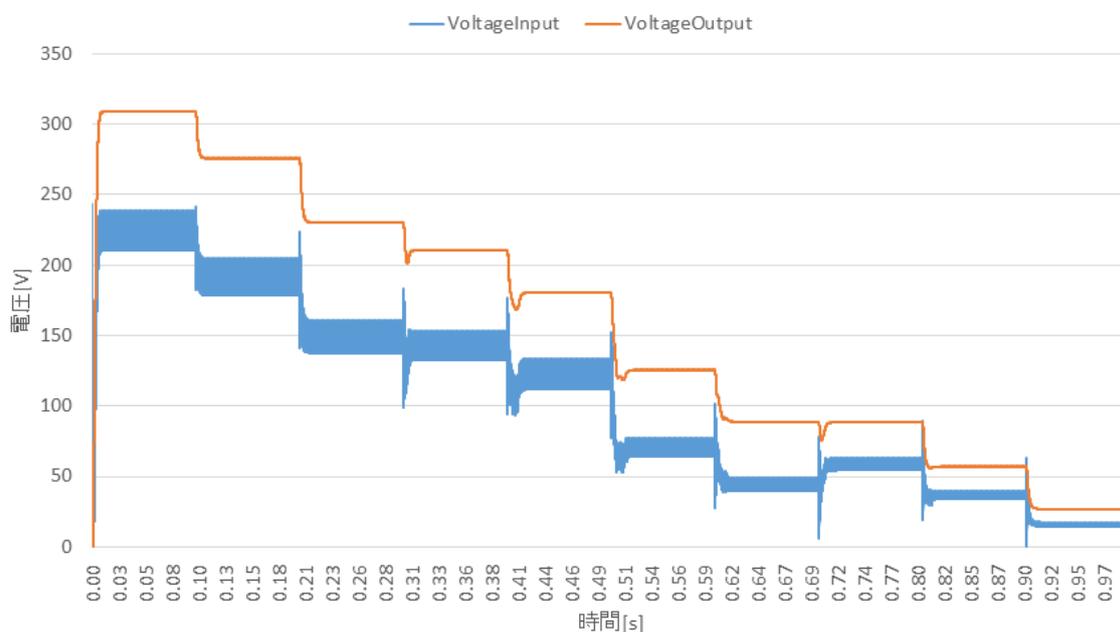
電力：昇圧回路の入出力の電力と理論値の差ができるだけ小さくする。

変調波：シミュレーション上の設定で基準値の変化範囲は 0~1 [V]である。基準値=0.5 [V]の時に電圧の昇圧比は 2 倍と想定する。放射照度の変化により、基準値が 0.3~0.5 [V]の範囲に安定すればいいと定義する。

以上の指標で以下の各手法の性能を検討する。

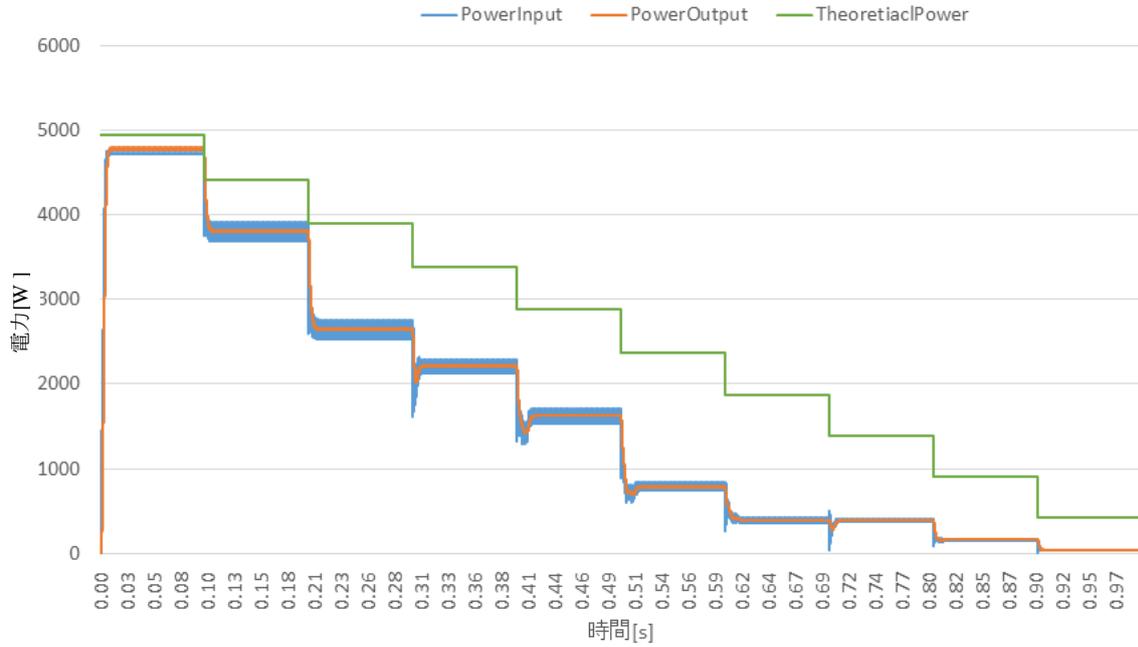
#### 4.2.4.4 P&O 法付従来の昇圧回路

段階的な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—電圧—



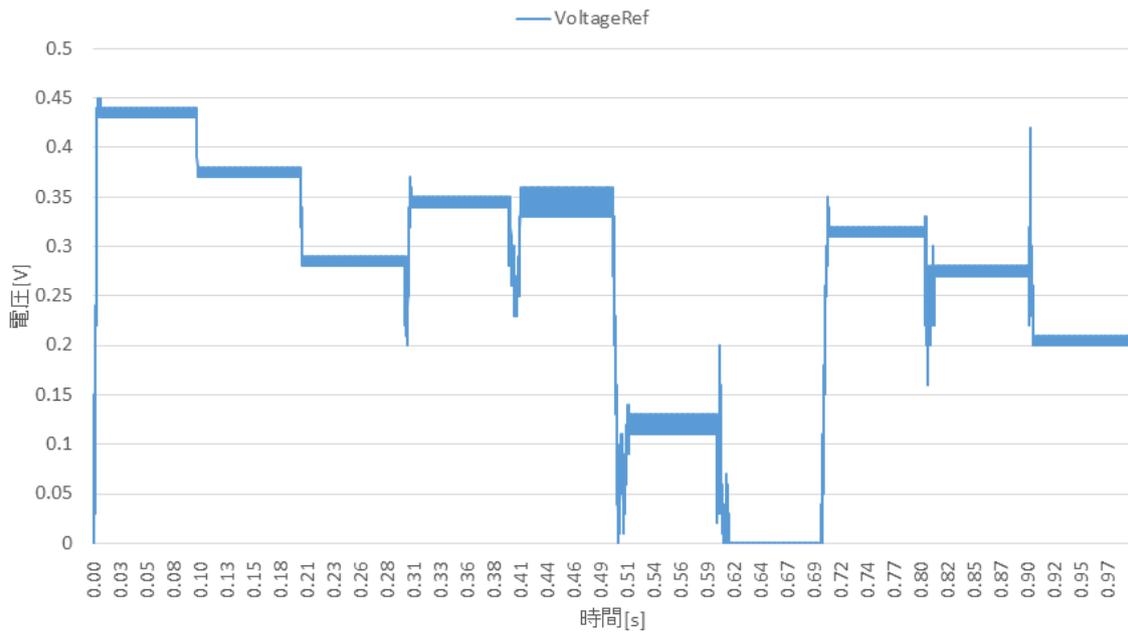
(a) 昇圧回路の入出力電圧

段階的な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

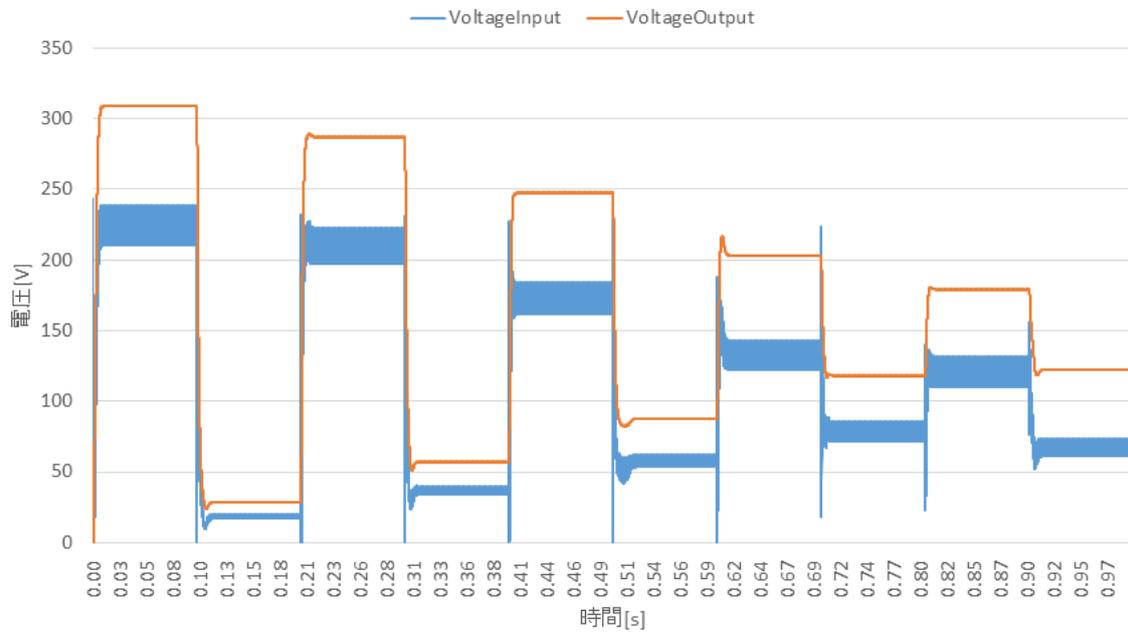
段階的な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—基準値—



(c) 昇圧回路の入力基準値

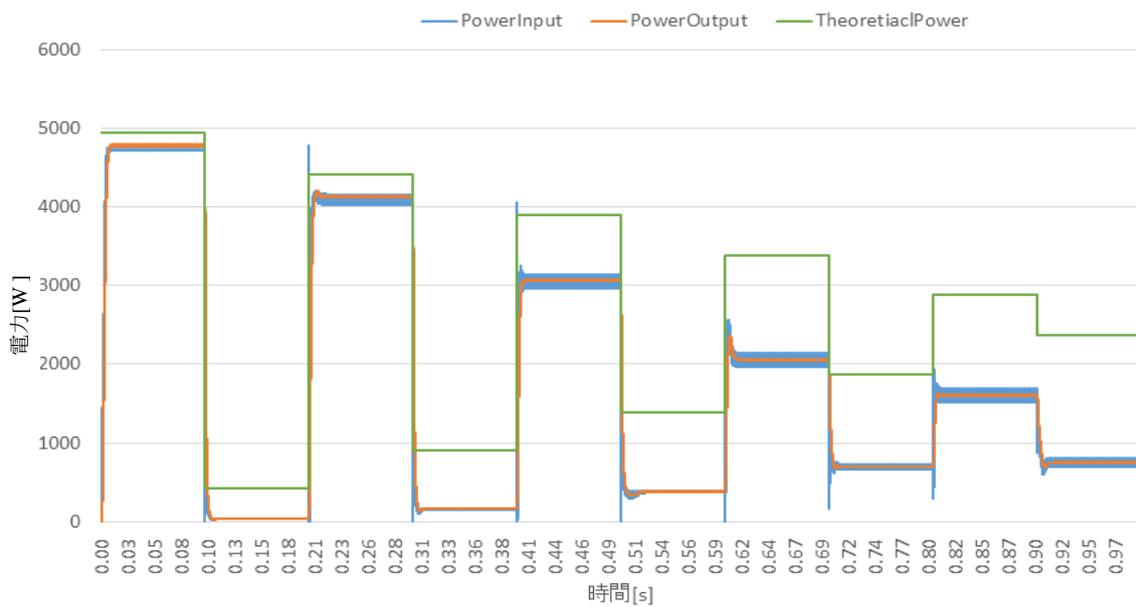
Fig.4-28 放射照度を段階的に減少する場合のシミュレーション結果

振動収束な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—電圧—



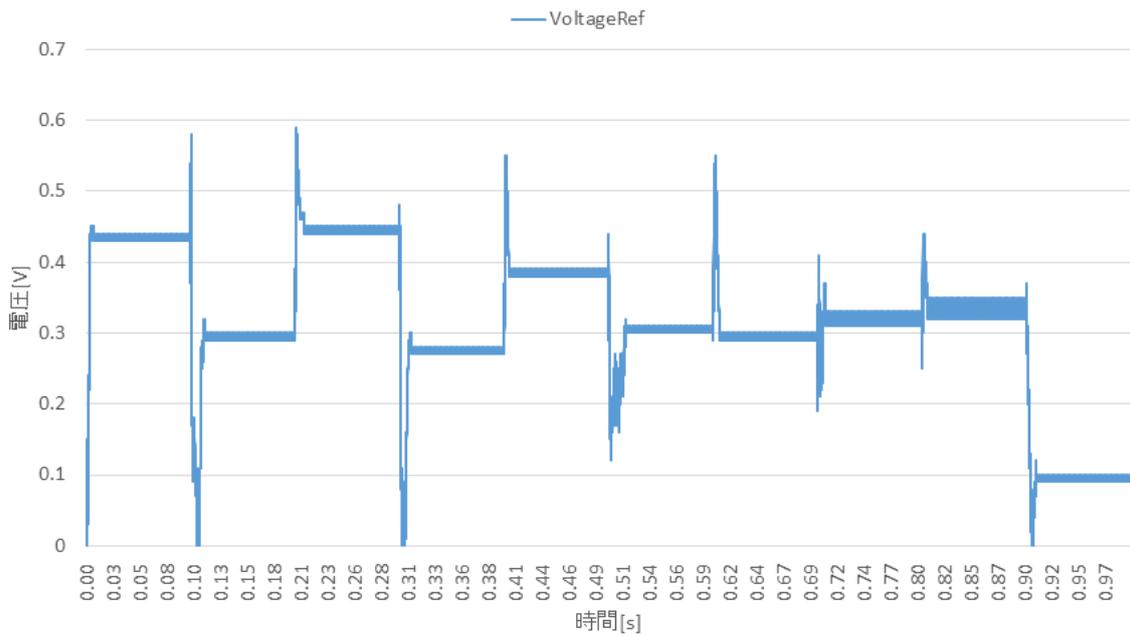
(a) 昇圧回路の入出力電圧

振動収束な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

振動収束な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とP&O法—基準値—



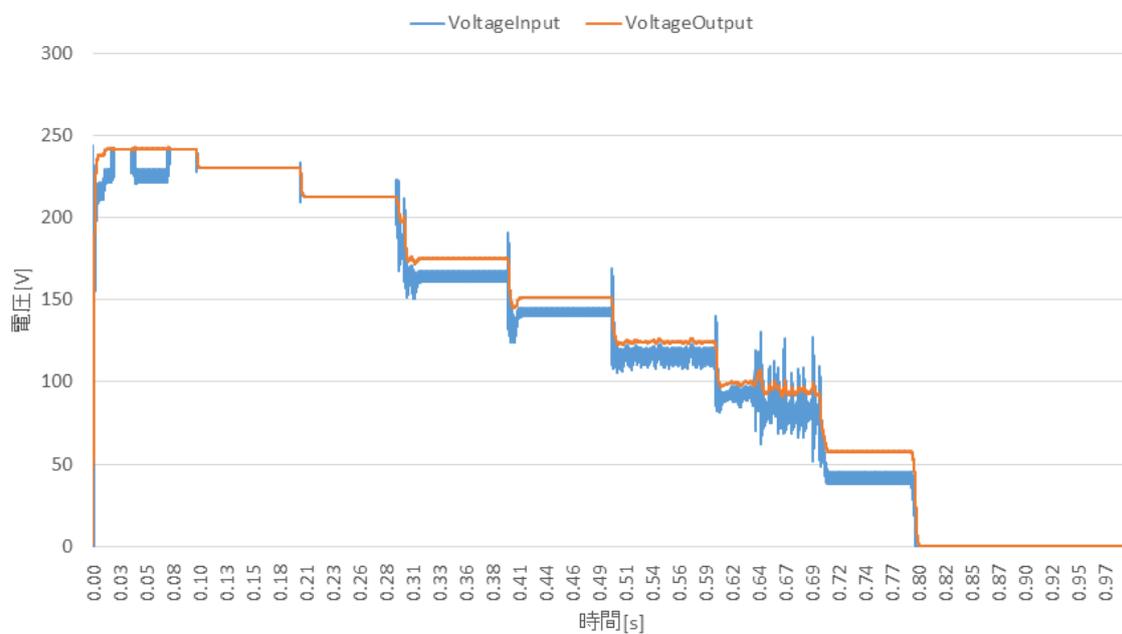
(c) 昇圧回路の入力基準値

Fig.4-29 放射照度を減衰振動的に増減する場合のシミュレーション結果

Fig.4-28 と Fig.4-29 より，従来の P&O 法と昇圧回路の昇圧率が約 1.3 倍に安定していた。変動する放射照度による出力電圧の変動範囲は約 20～230 [V]である。最大電力点の追従結果には約 200～2000 [W]の差が終始あった。基準値より，場合によって，Fig.4-28(c)の 0.6 秒以後のように昇圧回路が動作停止した時もある。それはいい結果とは言えない。

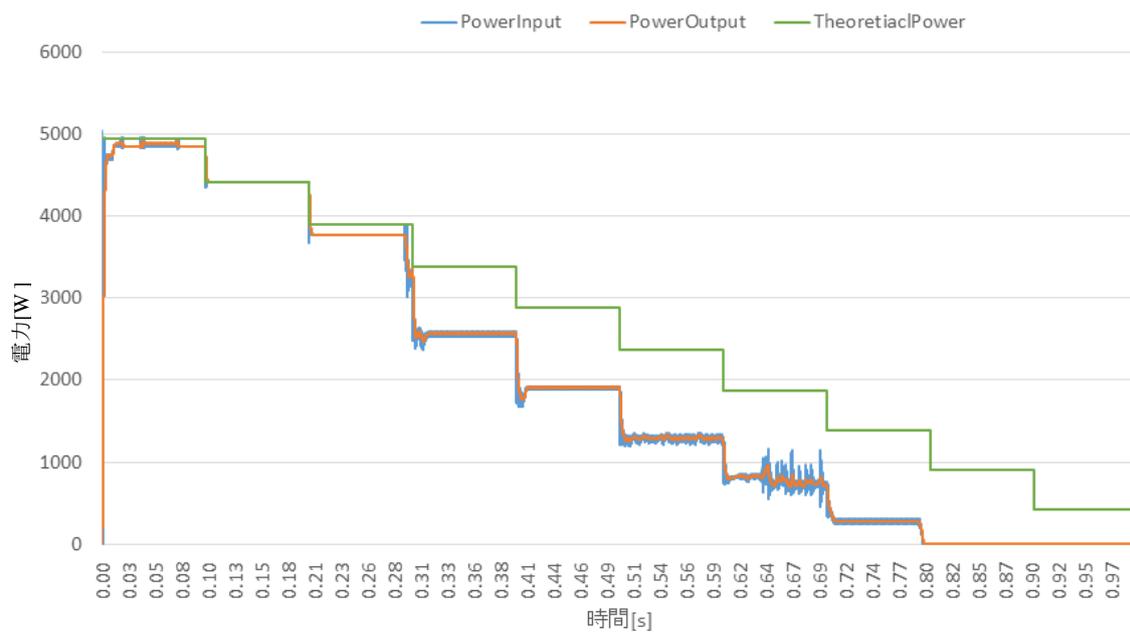
#### 4.2.4.5 INC 法付従来の昇圧回路

段階的な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とINC法—電圧—



(a) 昇圧回路の入出力電圧

段階的な放射照度変化での従来の開ループ昇圧回路とINC法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

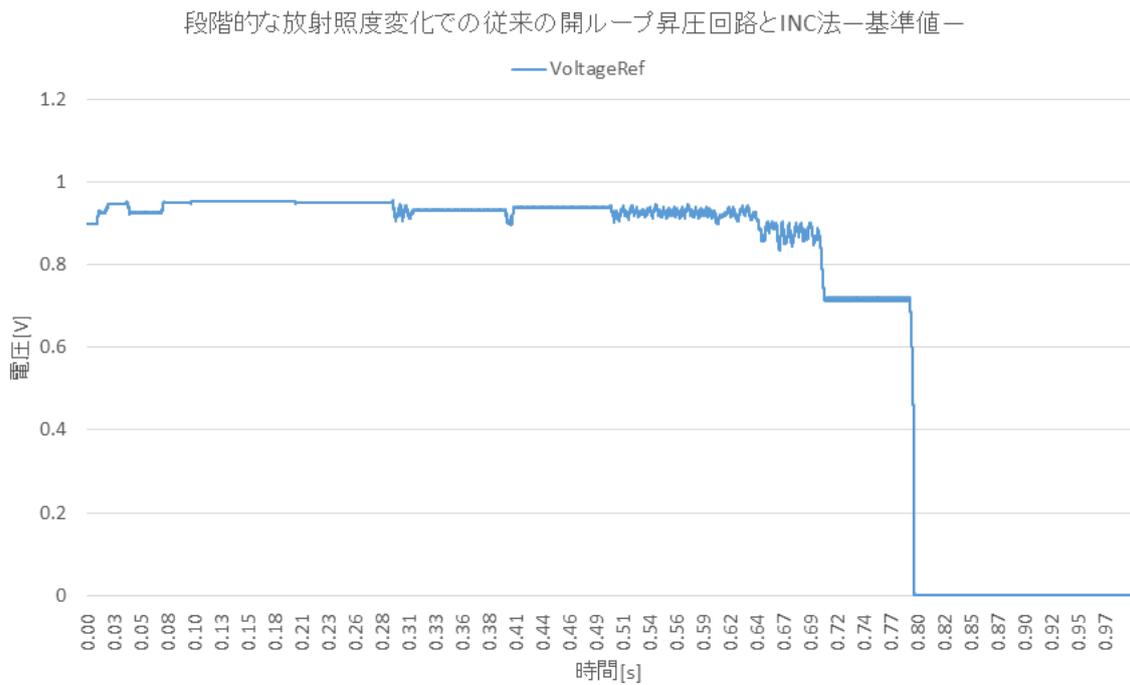
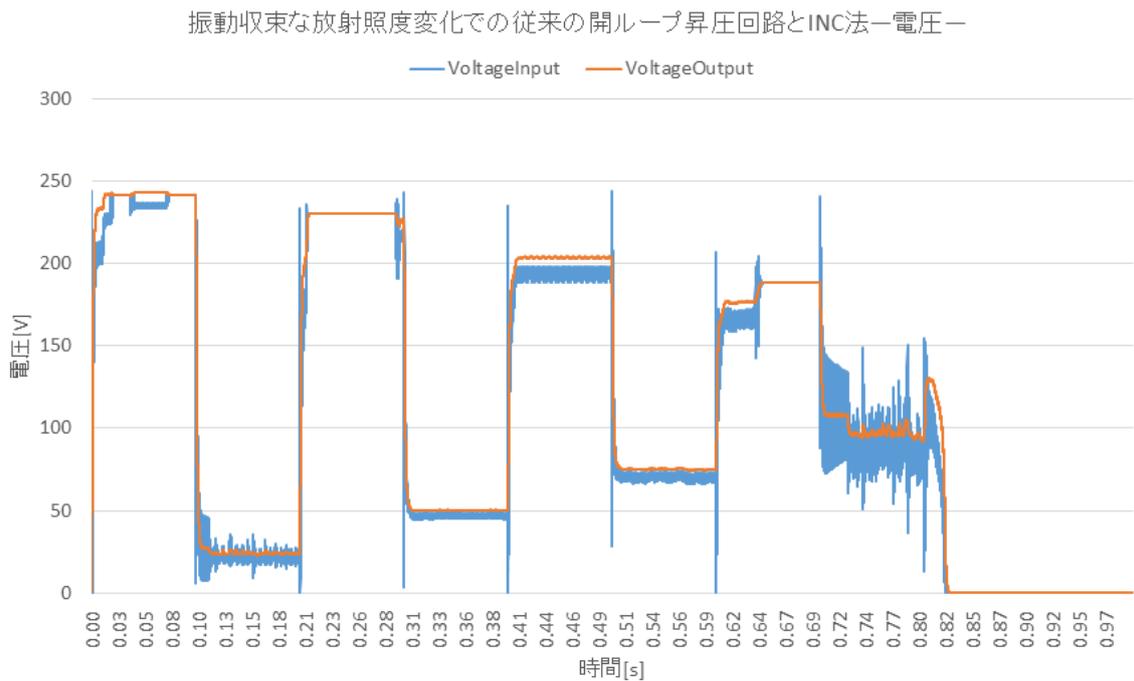
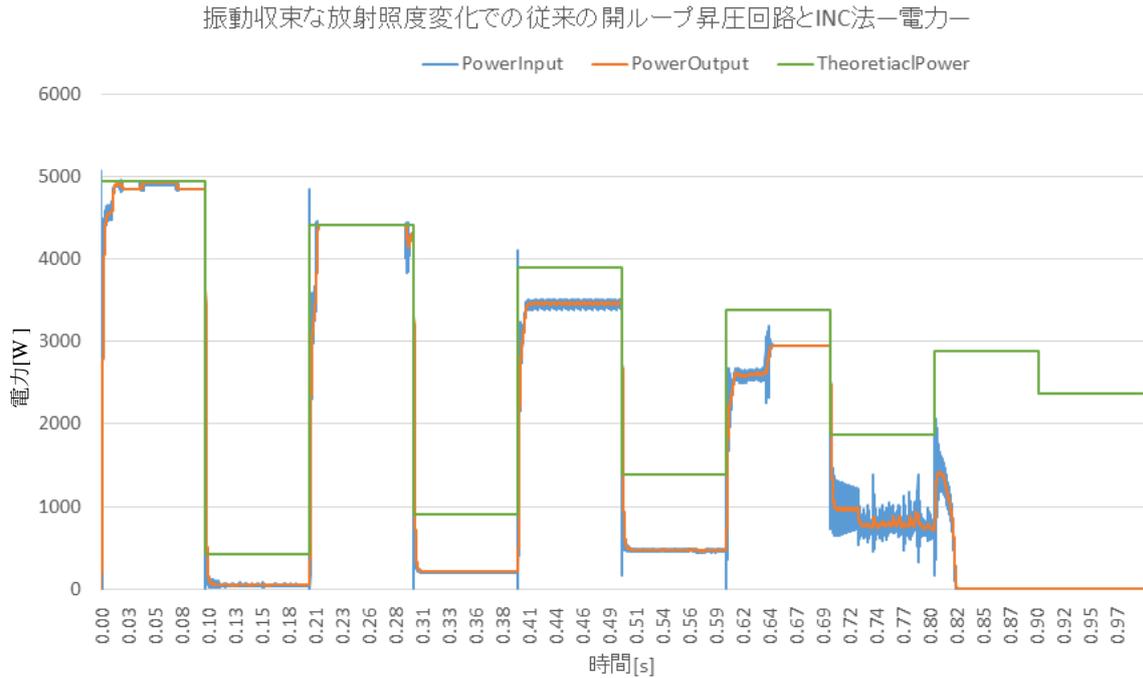
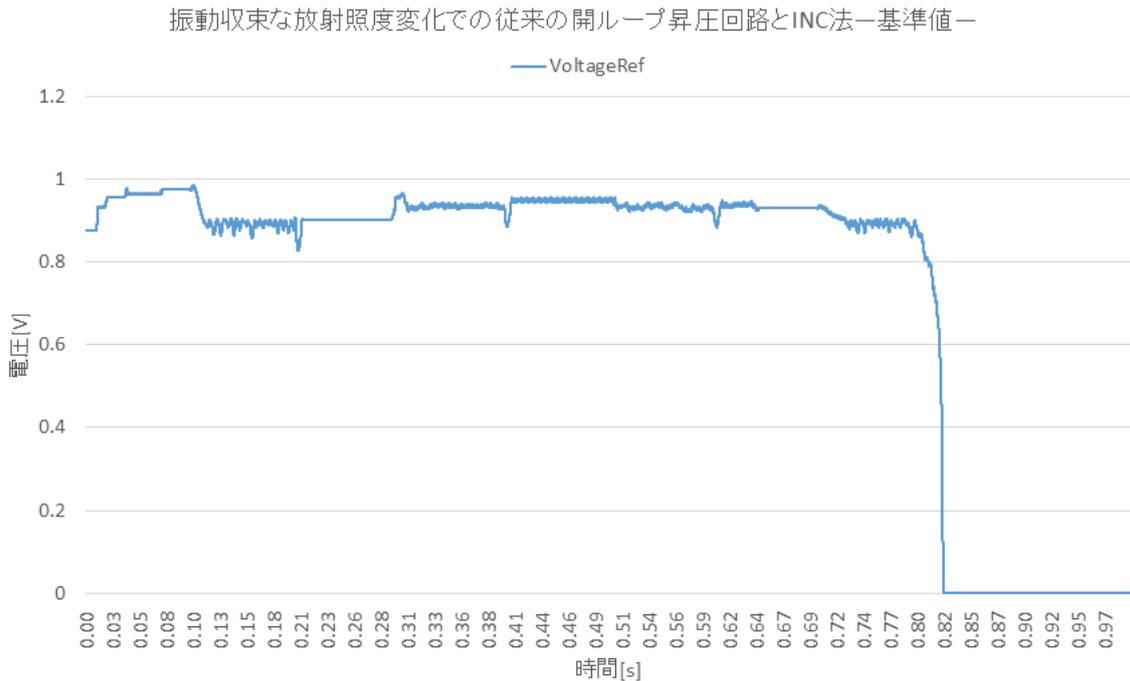


Fig.4-30 放射照度を段階的に減少する場合のシミュレーション結果





(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 昇圧回路の入力基準値

Fig.4-31 放射照度を減衰振動的に増減する場合のシミュレーション結果

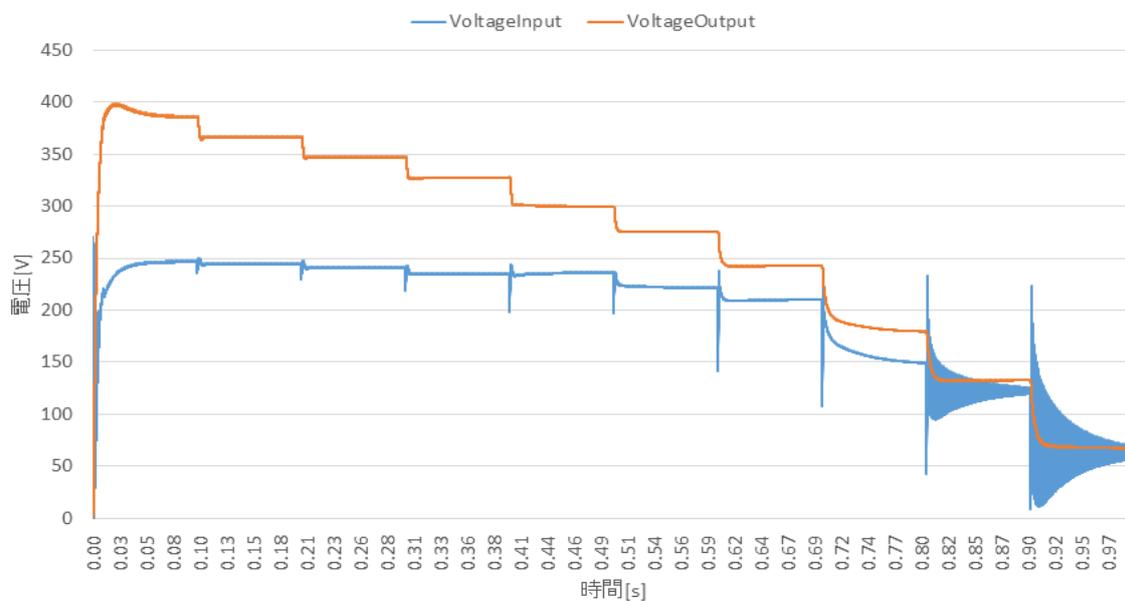
Fig.4-30 と Fig.4-31 より，昇圧率がほぼ 1 となり，時々動作不可能の場合もあることが判る。変動する放射照度による出力電圧の変動範囲は約 60~240 [V] である。最大電力点の追従結果には約 100~1000 [W] の差があった。さらに，放

射照度が少々低くなるとシステムが不安定な場合もあり、0.8秒以後のように動作停止した場合もあった。今までの研究経験より、実際にINC法を運用する時、アルゴリズム内部の比較しきい値の設定が重要であると考え。簡単に教科書のような0をしきい値と利用すると、制御が上手くできないことが多かった。更に、しきい値を適切に設定しないと、Fig.4-30(b)・Fig.4-31(b)の400 [W/m<sup>2</sup>]付近の波形が乱れた可能性がある。

なお、制御工学では制御パラメータを設定・調整する手法は多数知られており、一般的なのはボード線図やナイキスト線図の検討等である。ただし、本研究では使用したシミュレーションソフトウェアに内蔵されたパラメータ調整ロジックで追加したフィードバック回路を設計した。MPPTアルゴリズムをフィードバック回路と接続する際に、アルゴリズムの各判定しきい値は試行錯誤で定めた。これはINC法のしきい値に対する模索であるので、制御パラメータを調整する手法などが適用できないと考える。実応用する場合にしきい値の設定値を試行錯誤で得るしかないので、INC法の運用は簡単とは言えない。

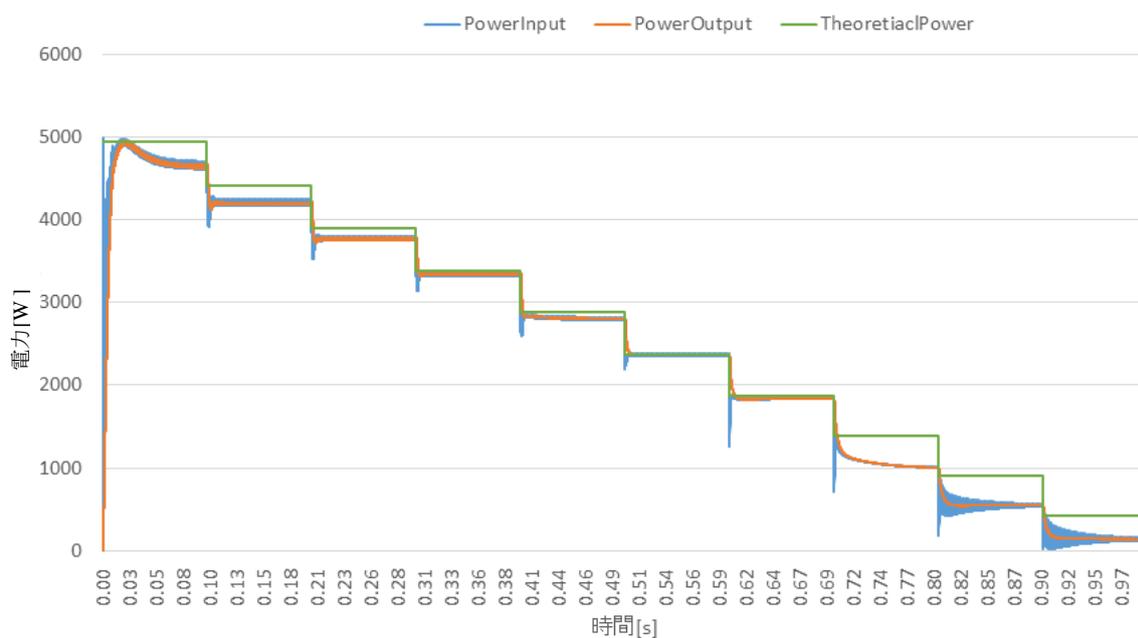
#### 4.2.4.6 P&O 法付定電圧制御昇圧回路

段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とP&O法—電圧—



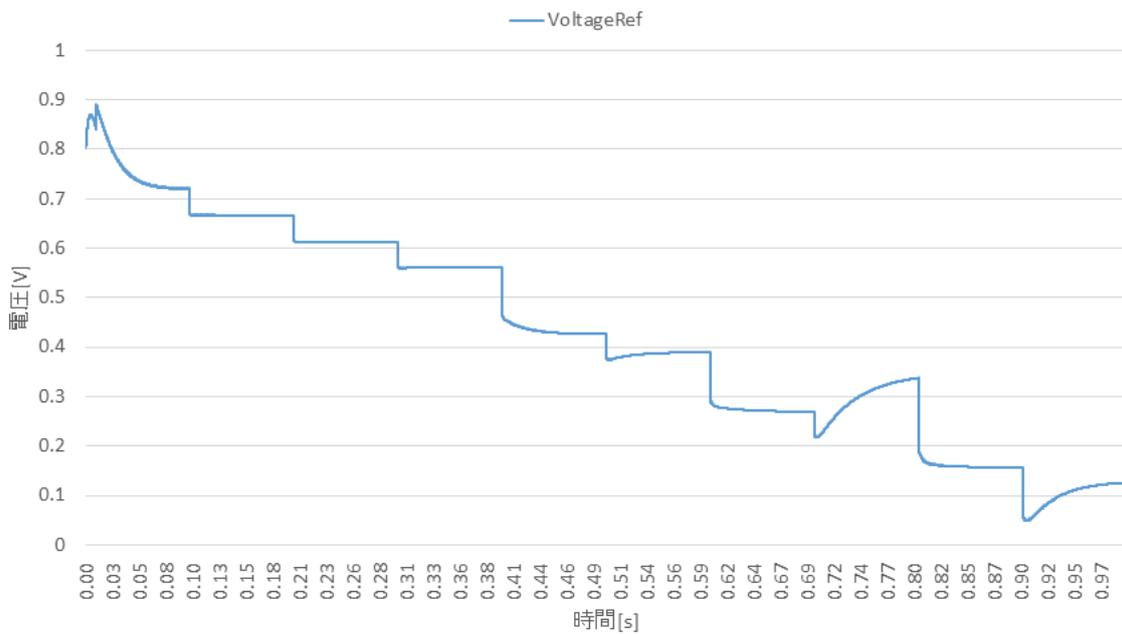
(a) 昇圧回路の入出力電圧

段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とP&O法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

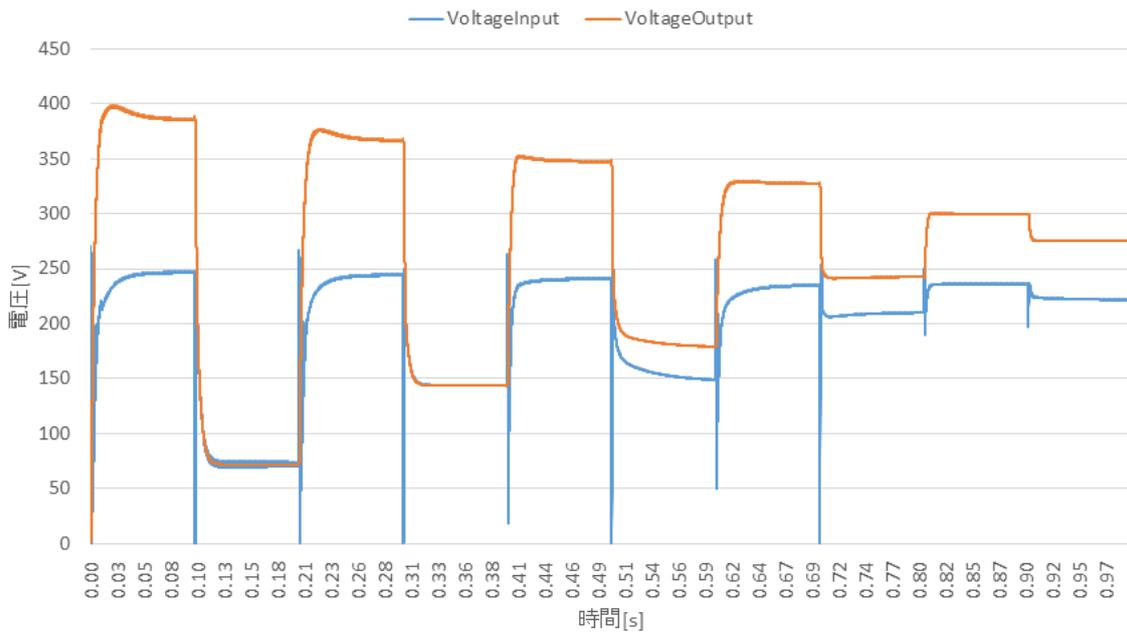
段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とP&O法—基準値—



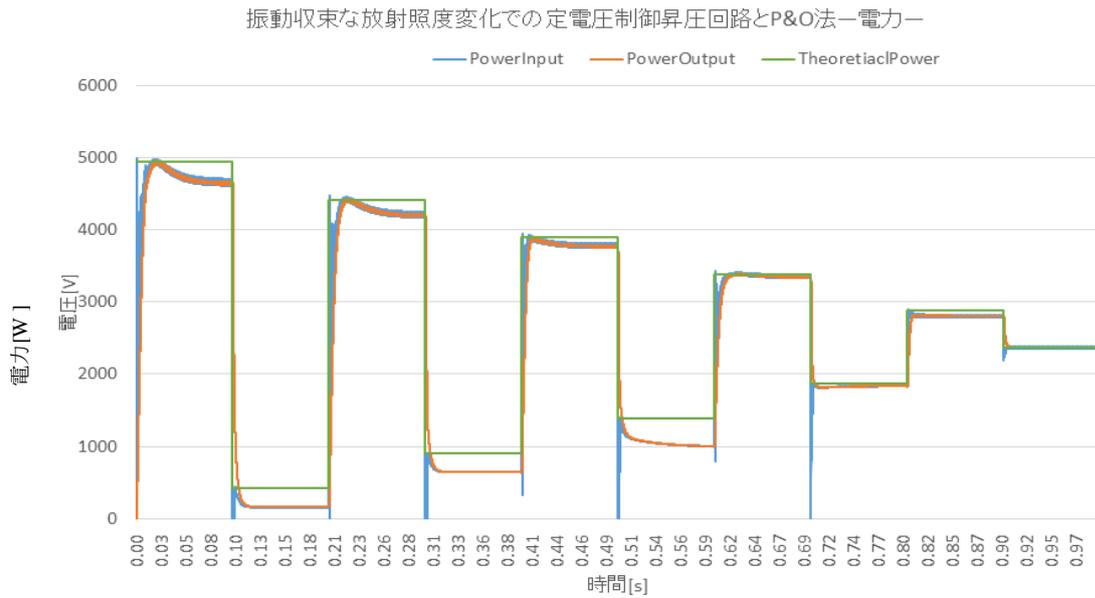
(c) 昇圧回路の入力基準値

Fig.4-32 放射照度を段階的に減少する場合のシミュレーション結果

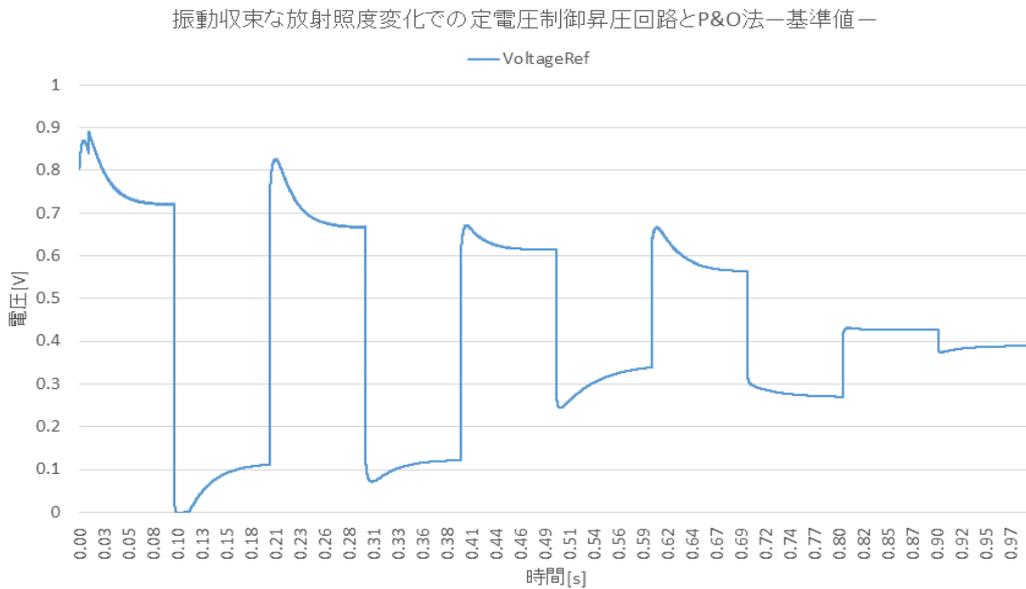
振動収束な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とP&O法—電圧—



(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



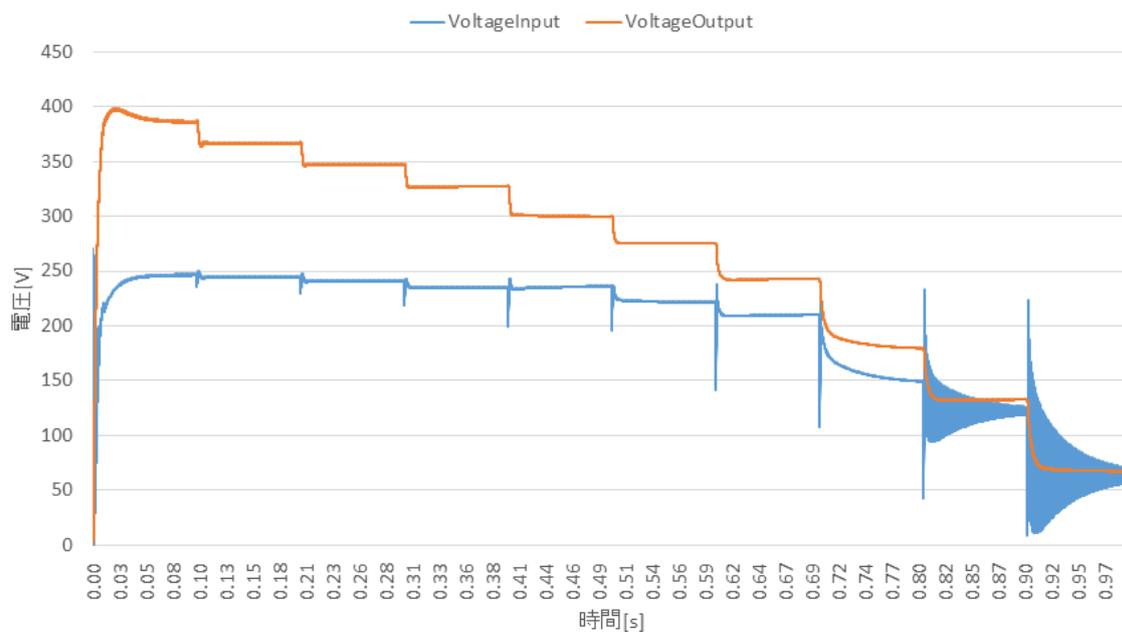
(c) 昇圧回路の入力基準値

Fig.4-33 放射照度を減衰振動的に増減する場合のシミュレーション結果

Fig.4-32 と Fig.4-33 より、電圧の昇圧率は約 1~1.6 倍の変化があった。注目すべき点は昇圧回路の入力電圧で、変化範囲は約 70~250 [V]である。特に放射照度が高い場合の安定度が良いと考える。この特徴は前節に述べた分断化アレイ回路の部分陰時に最大電力点の電圧がほとんど不変であったことと対応している。最大電力点の追従結果には約 50~300 [W]の差があり、開ループ昇圧回路の結果 (約 200~2000 [W]の差) より大幅に向上した。ただし、このパターンの欠点は変動に対する過渡時間とオーバーシュートである。

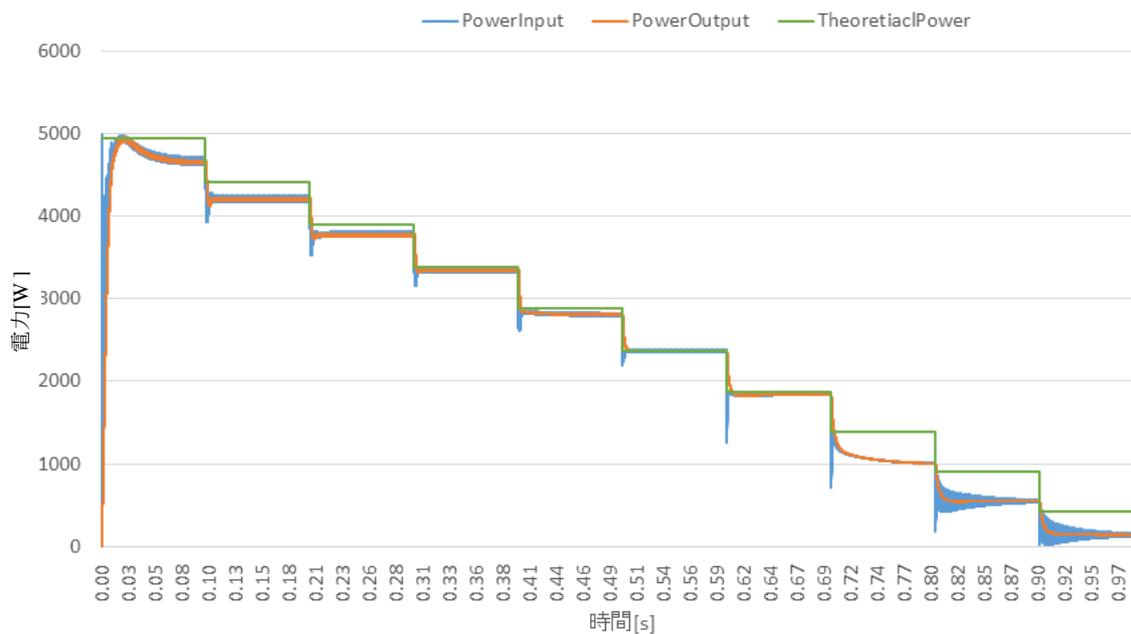
#### 4.2.4.7 INC 法付定電圧制御昇圧回路

段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—電圧—



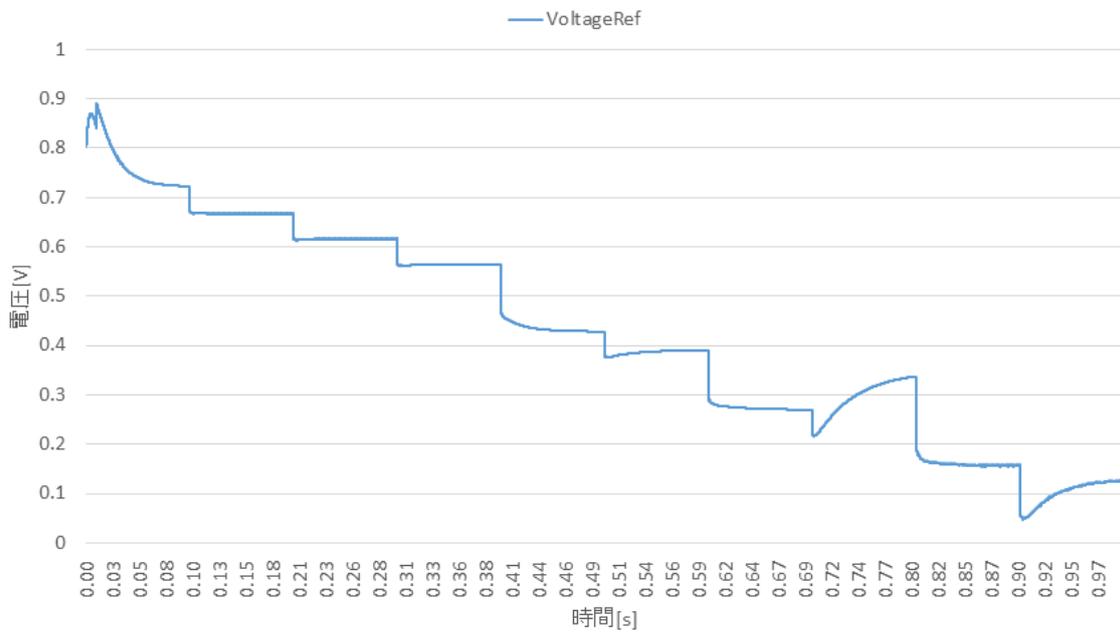
(a) 昇圧回路の入出力電圧

段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

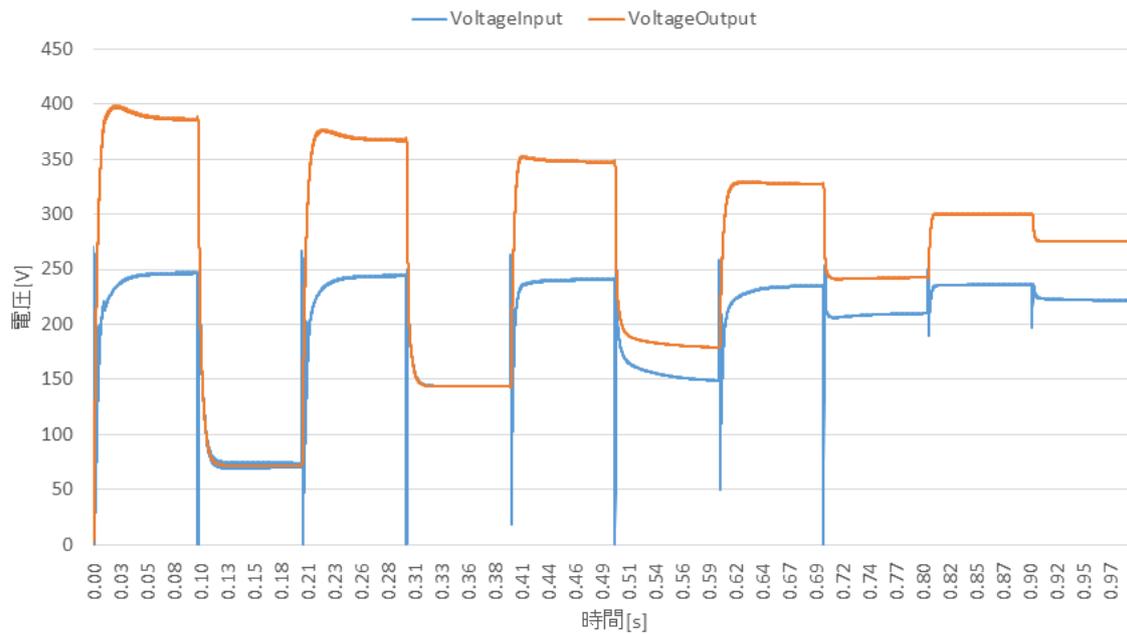
段階的な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—基準値—



(c) 昇圧回路の入力基準値

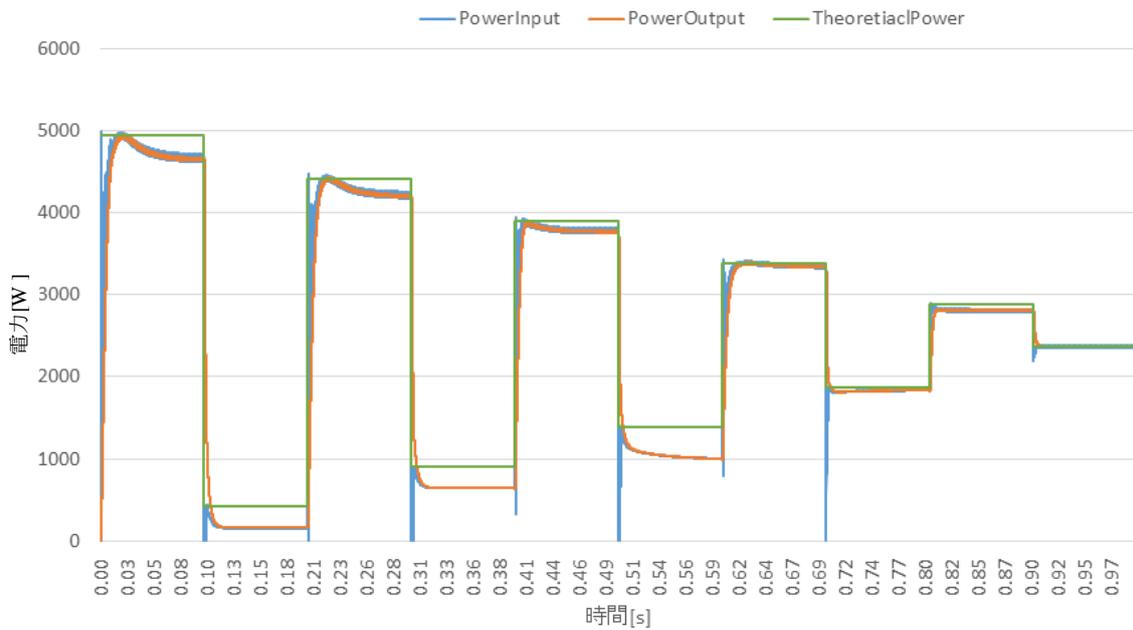
Fig.4-34 放射照度を段階的に変化する場合のシミュレーション結果

振動収束な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—電圧—



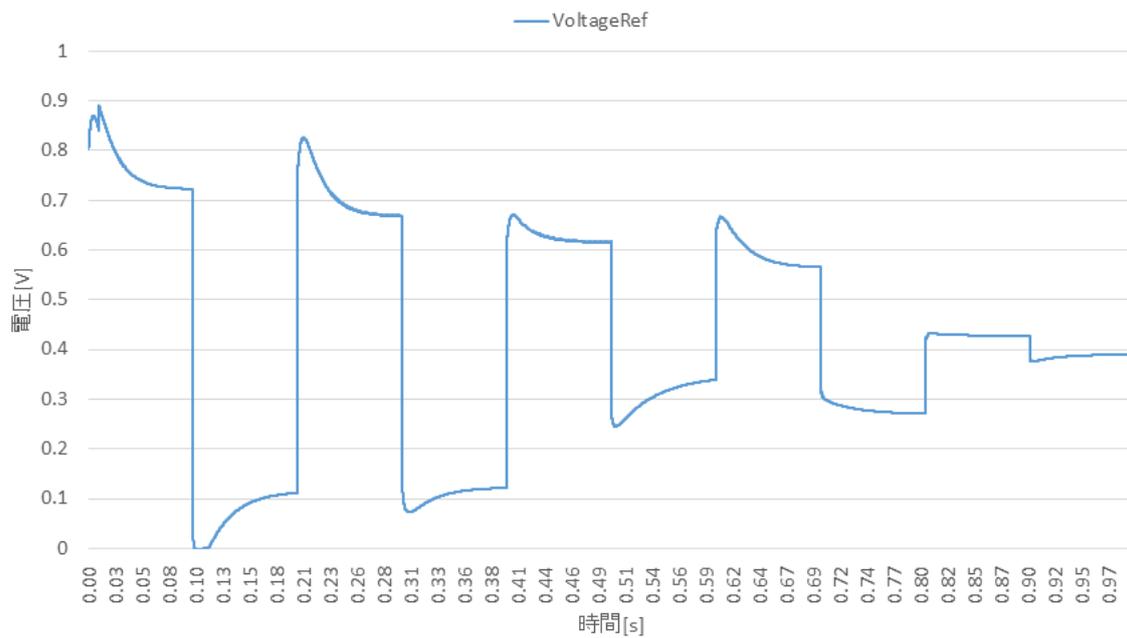
(a) 昇圧回路の入出力電圧

振動収束な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—電力—



(b) 昇圧回路の入出力電力

振動収束な放射照度変化での定電圧制御昇圧回路とINC法—基準値—



(c) 昇圧回路の入力基準値

Fig.4-35 放射照度を減衰振動的に変化する場合のシミュレーション結果

Fig.4-34 と Fig.4-35 を前節の Fig.32 と Fig.4-33 と比較すると、前節の結果とほぼ同じである。電圧の昇圧率は約 1~1.5 倍の変化があった。注目すべき点が昇圧回路の入力電圧で、変化範囲は約 70~250 [V]である。特に放射照度が高

い場合の安定度が良いと考える。この特徴は前節に述べた分断化アレイ回路の部分陰時に最大電力点の電圧がほとんど不変のことと対応している。最大電力点の追従結果には約 50~100 [W]の差になり，開ループ昇圧回路の結果（約 100~1000 [W]の差）より大幅に向上した。ただし，このパターンの欠点は変動に対する過渡時間とオーバーシュートである。

以上の各結果をまとめると Table.4-4 を得る。

Table.4-4 シミュレーションで異なる放射照度での特性検証

回路 項目	従来の昇圧回路		本研究提案した昇圧回路	
	P&O 法付開ループ昇圧回路+通常アレイ回路	INC 法付開ループ昇圧回路+通常アレイ回路	P&O 法付定電圧制御昇圧回路+通常アレイ回路	INC 法付定電圧制御昇圧回路+通常アレイ回路
アレイ回路の出力電力と理論値との差	約 200~2000 [W]	約 100~1000 [W]	約 50~300 [W]	約 50~100 [W]
昇圧率	約 1.3 倍	ほぼ 1	約 1~1.6 倍	約 1~1.5 倍
アレイ回路電圧の変動範囲	約 20~230 [V] 段階的低下	約 60~240 [V] 段階的低下	約 70~250 [V] 比較的に安定	約 70~250 [V] 比較的に安定
評価と理由 A→F	<b>D</b> 最大電力点への追従性能が低い	<b>F</b> 時々動作不可能になった	<b>B</b> アレイ回路電圧を安定したが，電力の損失が比較的に大きい	<b>A</b> アレイ回路電圧が安定かつ電力の損失が低い

#### 4.2.4.8 部分陰における太陽電池アレイ回路の電力損失

シミュレーション用アレイ回路は Fig.4-36 に示される。放射照度は 1000 [W/m<sup>2</sup>]と設定する。部分陰は一位陰 0 を使用し、陰にかかるモジュールの放射照度を 150 [W/m<sup>2</sup>]と設定する。各データはシステムが安定してから取られたものである。

シミュレーション結果を比較して Table.4-5 にまとめる。

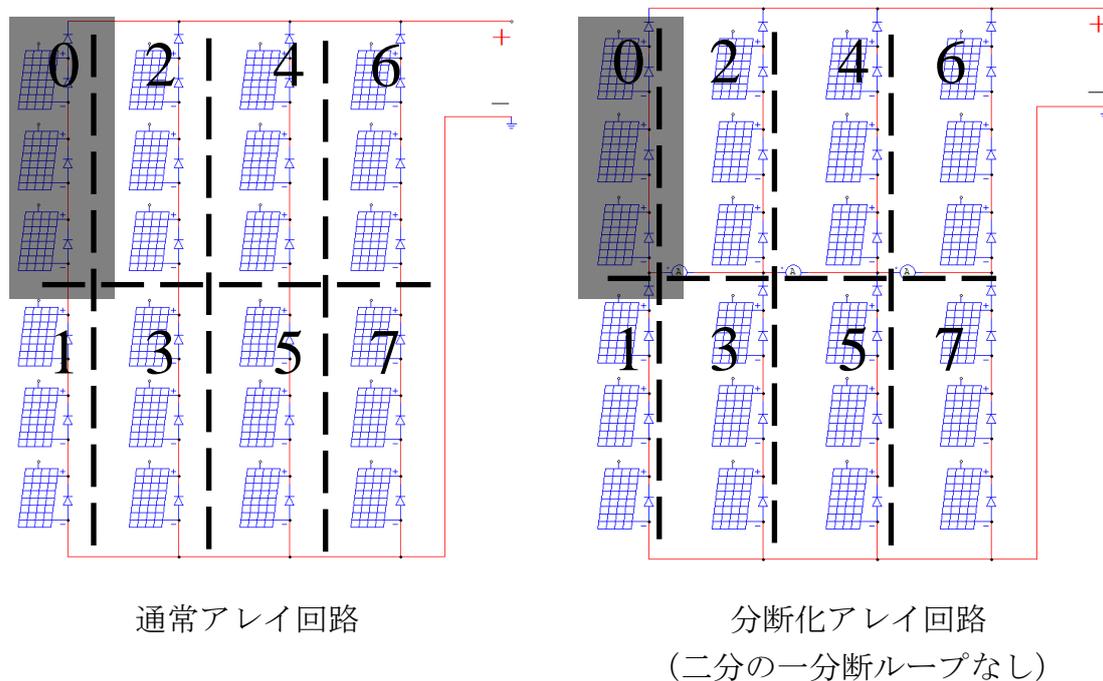


Fig.4-36 シミュレーション用アレイ回路と一位陰 0 の発生例

Table.4-5 部分陰での特性検討

項目 \ 回路	従来の発電システム		本研究提案した発電システム			
	P&O 法付開 ループ昇圧 回路+ 通常アレイ 回路	INC 法付 開ループ昇 圧回路+ 通常アレイ 回路	P&O 法付 定電圧制御 昇圧回路+ 通常アレイ 回路	INC 法付 定電圧制御 昇圧回路+ 通常アレイ 回路	P&O 法付 定電圧制御 昇圧回路+ 分断化アレ イ回路	INC 法付 定電圧制御 昇圧回路+ 分断化アレ イ回路
部分陰での 電力損失	41.76 [%]	20.86 [%]	31.10 [%]	23.4 [%]	19.84 [%]	19.88 [%]
出力できる電 力向上の割合	基準 : 100%	(120.9%)	(110.66%)	(118.36%)	(121.92%)	(121.88%)
昇圧回路 電圧出力	226.4 [V] DC	204.40 [V] DC	330.91 [V] DC	348.80 [V] DC	357.3 [V] DC	356.88 [V] DC

昇圧率	1.85	1.03	1.70	1.43	1.575	1.46
リップル電圧 V <sub>p-p</sub> <3 [V]	0.34 [V]	0.06 [V]	1.57 [V]	1.03 [V]	1.34 [V]	1.12 [V]
評価と理由 A→F	D 最大電力点 への追従性 能が低い。	F 昇圧率は約 1で、動作 不可能であ る。	C アレイ回路 電圧を安定 したが、電 力の損失が 比較的に大 きい。	C アレイ回路 電圧が安定 したが、電 力の損失が 比較的に大 きい。	B アレイ回路 電圧が安定 かつ電力の 損失が比較 的に低い。 リップル電 圧が比較的 に高い。	A アレイ回路 電圧が安定 かつ電力の 損失が比較 的に低い。 リップル電 圧低い

以上の比較結果より、性能的には INC 法付定電圧制御昇圧回路と分断化アレイ回路の組み合わせが総合的に良いと考えられる。4.3 節に述べる部分陰の位置判定に INC 法付定電圧制御昇圧回路と分断化アレイ回路の組み合わせを使用した。

## 4.3 部分陰位置判定法

ブリッジ電流と部分陰がかかった位置との間には関係がある。ブリッジ電流を既に入手できたデータとして使用し、色々な機能を開発できる。本節にはブリッジ電流情報の利用法の一つ：「部分陰の位置判定法」を検討する。

### 4.3.1 この機能の必要性

既述の分析で、部分陰の発生原因が多様であることがわかった。太陽光発電システムの発電量を多めに確保するために、部分陰の発生や発生場所及びその影響範囲を把握したほうが良いと考える。そうすれば陰の位置情報を用い、機械学習に基づく MPPT 手法が開発できる。同時に、発電システムに対する防犯・監視機能も実現できるので、システムの所有者向けの説明や出力損失の予測などにも利用できる。本論文ではこのように太陽光発電システムの将来の「見える」化、高機能かも見すえ、陰の位置判定手法を中心に検討し、他の案を今後の課題とする。この機能があれば太陽電池アレイ回路を監視することが達成できる。

### 4.3.2 判定法の提案

簡易計算判定法： possible の限りに、ブリッジ電流を簡単な計算と比較することで部分陰の位置を判定することである。この方法はループなしの分断法しか使えない。

### 4.3.3 簡易計算判定法の提案

#### 4.3.3.1 一位陰の位置判定

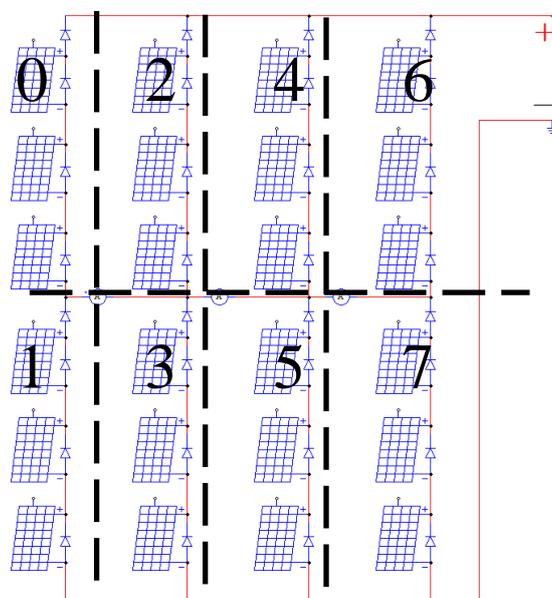


Fig.4-37 分断化アレイ回路の位置分け

放射照度を 1000 [W/m<sup>2</sup>], モジュール表面温度を 25 [°C]とする。陰となる部分は Fig.4-37 の 8 つの部分ランダムに一つ選び、選ばれた 3 枚の太陽電池モジュールが受けられる太陽光の放射照度を元の 15 [%]まで低減する。シミュレーションで得られたブリッジ電流は Table.4-6 に示す通りである。

Table.4-6 一位陰のブリッジ電流

<b>Datasheet of Bridge Current : 1 place shadow</b>						
Unit: [A], Flow to right is PLUS						
Assemble	Bridge Current					
	A1		A2		A3	
	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude
0	+	3.97	+	2.65	+	1.32
1	-	3.97	-	2.65	-	1.32
2	-	1.32	+	2.65	+	1.32
3	+	1.32	-	2.65	-	1.32
4	-	1.32	-	2.65	+	1.32
5	+	1.32	+	2.65	-	1.32
6	-	1.32	-	2.65	-	3.97
7	+	1.32	+	2.65	+	3.97

電流の方向に注目すると、+ (しきい値以上の大きさの電流が図中右向きに流れる)・- (しきい値以上の大きさの電流が図中左向きに流れる)・0 (大きさがしきい値に達しない) があり、その観点で結果をまとめると Table.4-7 を得る。判定しきい値の大きさは試行錯誤で決めた。

Table.4-7 三進法と十進法の関係

Decimal	Triad			Decimal	Triad		
No.	A1	A2	A3	No.	A1	A2	A3
0	0	0	0	14	+	+	-
1	0	0	+	15	+	-	0
2	0	0	-	16	+	-	+
3	0	+	0	17	+	-	-
4	0	+	+	18	-	0	0
5	0	+	-	19	-	0	+
6	0	-	0	20	-	0	-
7	0	-	+	21	-	+	0
8	0	-	-	22	-	+	+
9	+	0	0	23	-	+	-
10	+	0	+	24	-	-	0
11	+	0	-	25	-	-	+
12	+	+	0	26	-	-	-
13	+	+	+				

本論文では、このように+・-・0で向きを表すことを三進法と呼ぶ。Table.4-2のデータをTable.4-7で判定すると、Table.4-8が得られた。

Table.4-8 一位陰の判定

<b>Datasheet of Bridge Current : 1 place shadow</b>							
Unit: [A], Flow to right is PLUS							
Assemble	Bridge Current						Judgment
	A1		A2		A3		
	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	
0	+	3.97	+	2.65	+	1.32	13
1	-	3.97	-	2.65	-	1.32	26
2	-	1.32	+	2.65	+	1.32	22
3	+	1.32	-	2.65	-	1.32	17
4	-	1.32	-	2.65	+	1.32	25
5	+	1.32	+	2.65	-	1.32	14
6	-	1.32	-	2.65	-	3.97	26
7	+	1.32	+	2.65	+	3.97	13

Table.4-8の判定結果の中に、重複しているもの（Judgmentの列の黄色と緑色）があるため、これだけで一位陰の位置判定は出来ないことが分かる。

次に電流の大きさを使用し、重複しているものを区別させる。電流の計算パターンがTable.4-9に示されている。

Table.4-9 電流の数値計算

Pattern	Equation	Judgment
1	$(A1-A2)/A3 \approx 1$	0,1,4,5
2	$(A1+A2)/A3 \approx 1$	2,3,6,7

Table.4-9のパターン1と2を使えば、部分陰の1と8,2と7が分離できる。このように電流の方向と大きさを両方使って判断する方法を二段判断法と呼ぶこととする。

つまり、二段判断法で一位陰の位置を判定する流れは：

1. 三進法の計算
2. ブリッジ電流の大きさからのパターン判定

となり、一位陰の位置判定に有効である。

一位陰の判定とMPPTの動作との関係をFig.4-38のフローチャート図に示す。

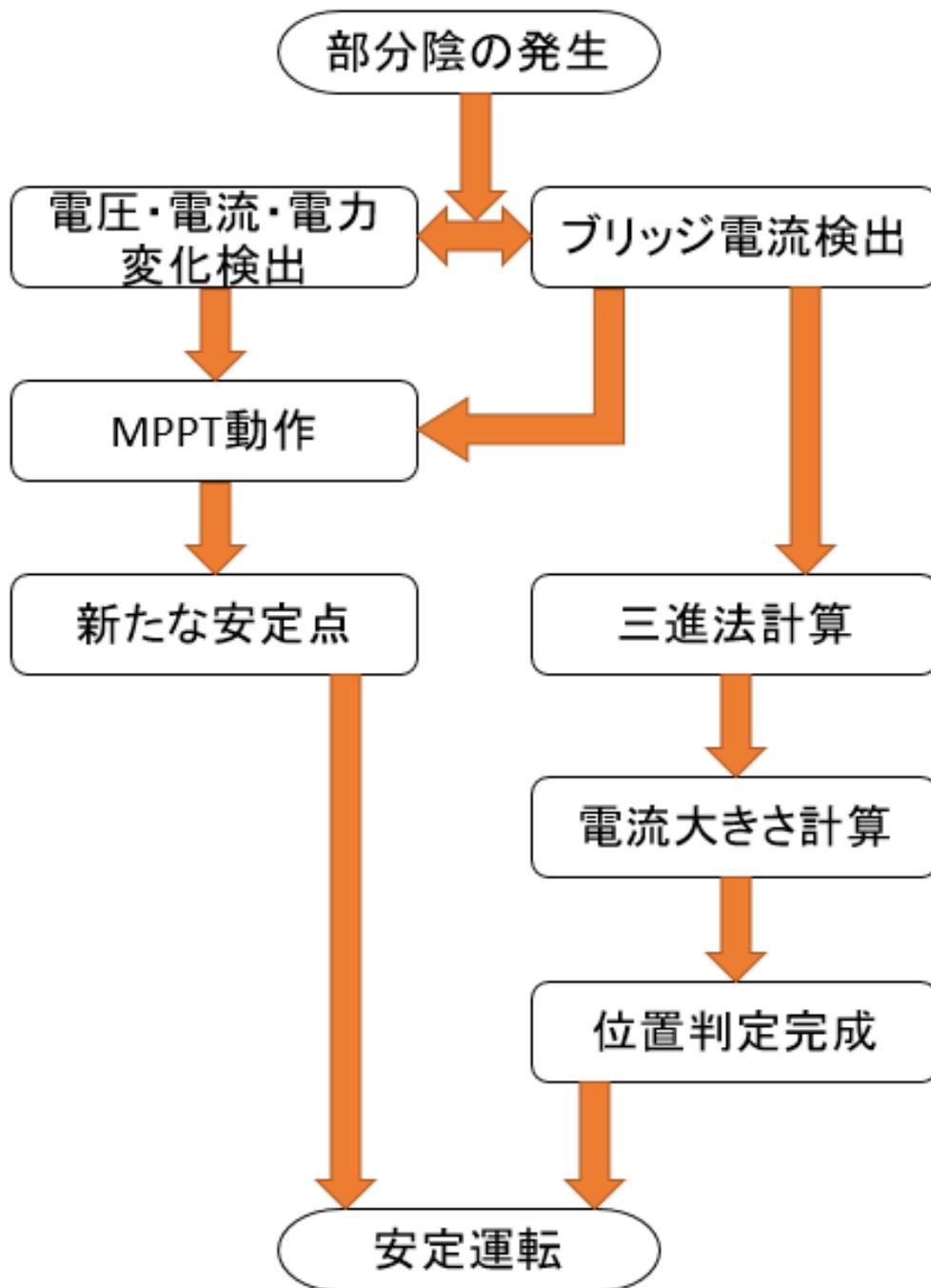
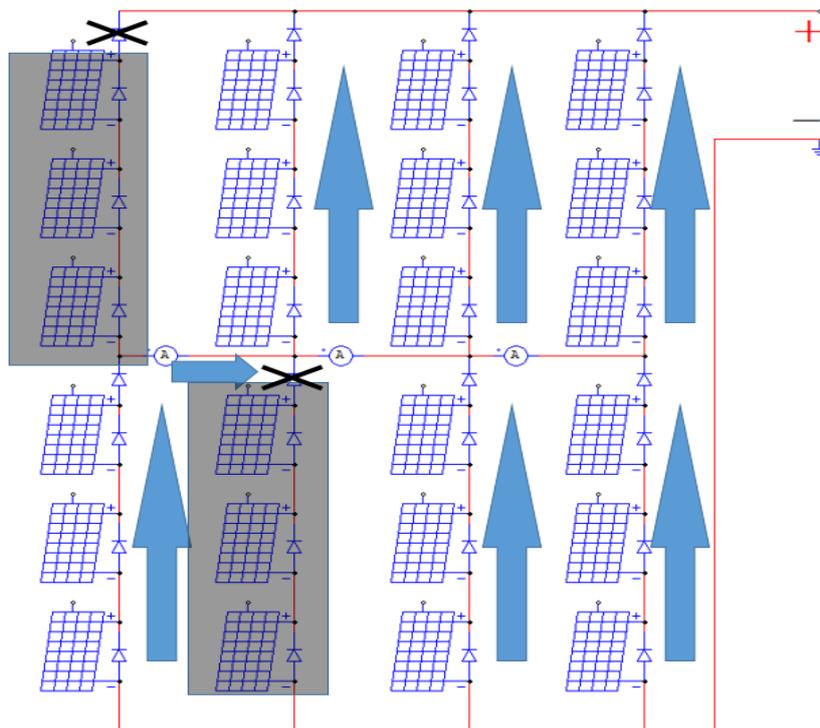


Fig.4-38 一位陰の判定と MPPT の動作とのフローチャート図

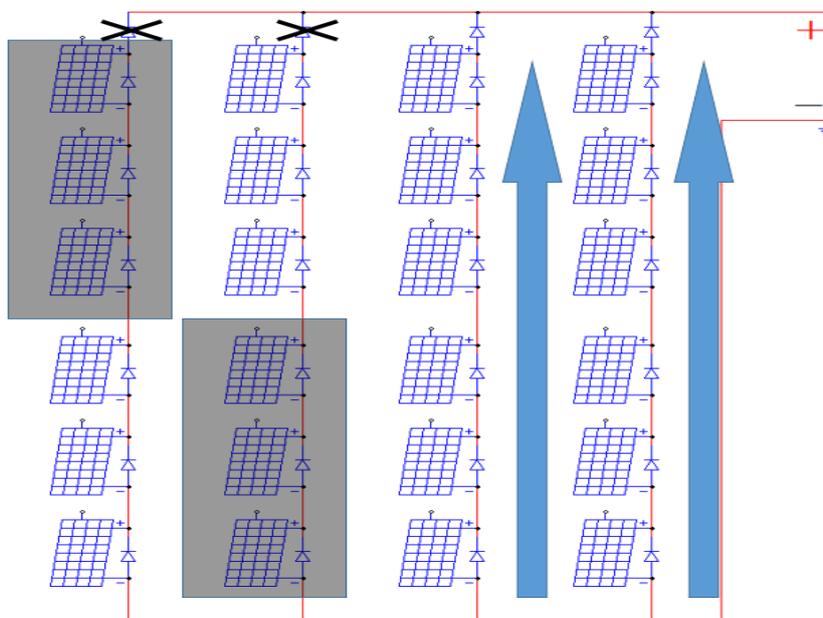
一位陰の判定はシンプルで、MPPT の動作と同時に完成できる。ブリッジ電流の検出とアレイ回路の電圧・電流の変化検出が MPPT アルゴリズムのトリガーである。

### 4.3.3.2 二位陰の場合のブリッジ電流についての分析

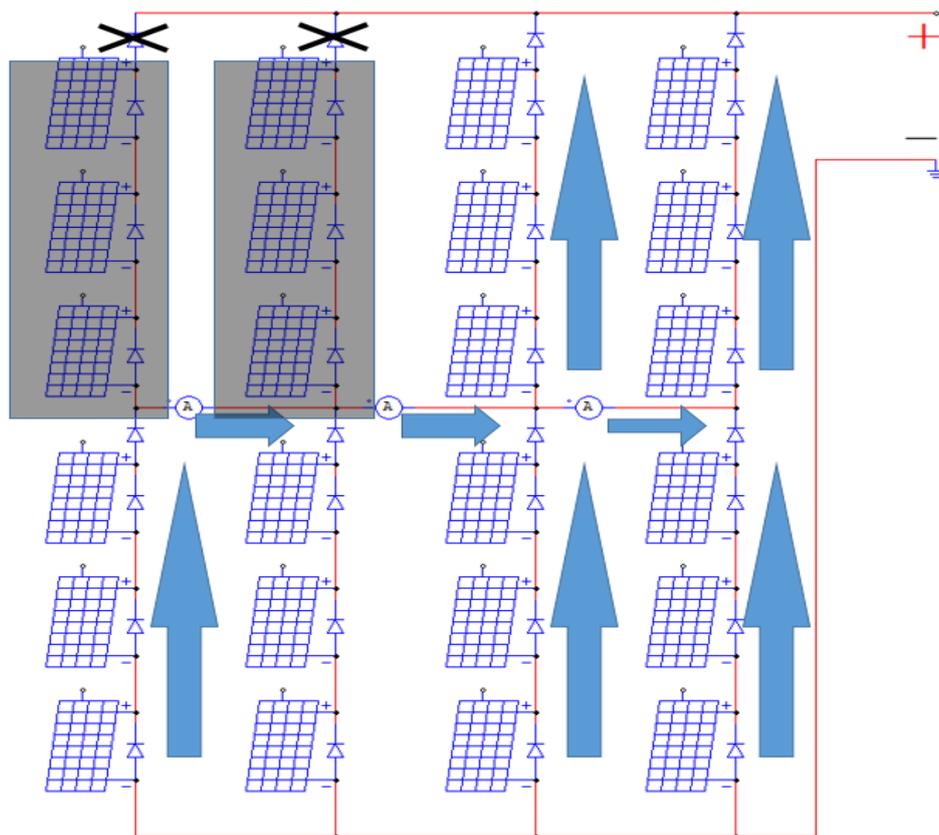
二位陰の判定の場合，二ヶ所の陰が組み合わせるため，一位陰より複雑になる。  
**Fig.4-39** に示すように，分断化アレイ回路と通常アレイ回路の状態として三通りに分類できる (Type I~III)。



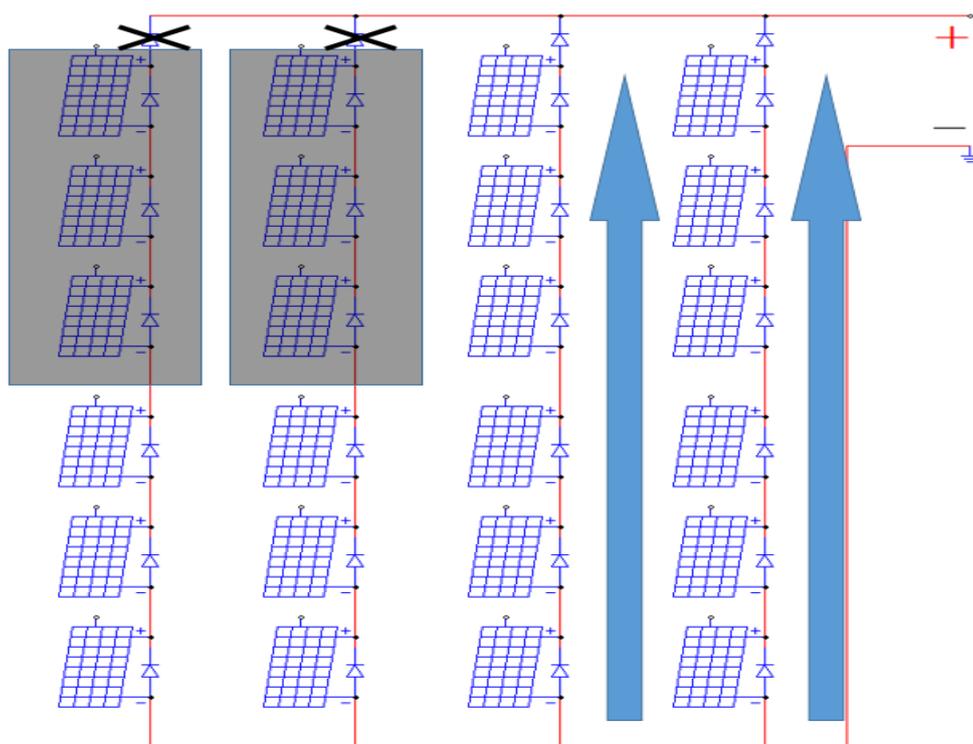
(a) 分断化アレイ回路の Type I



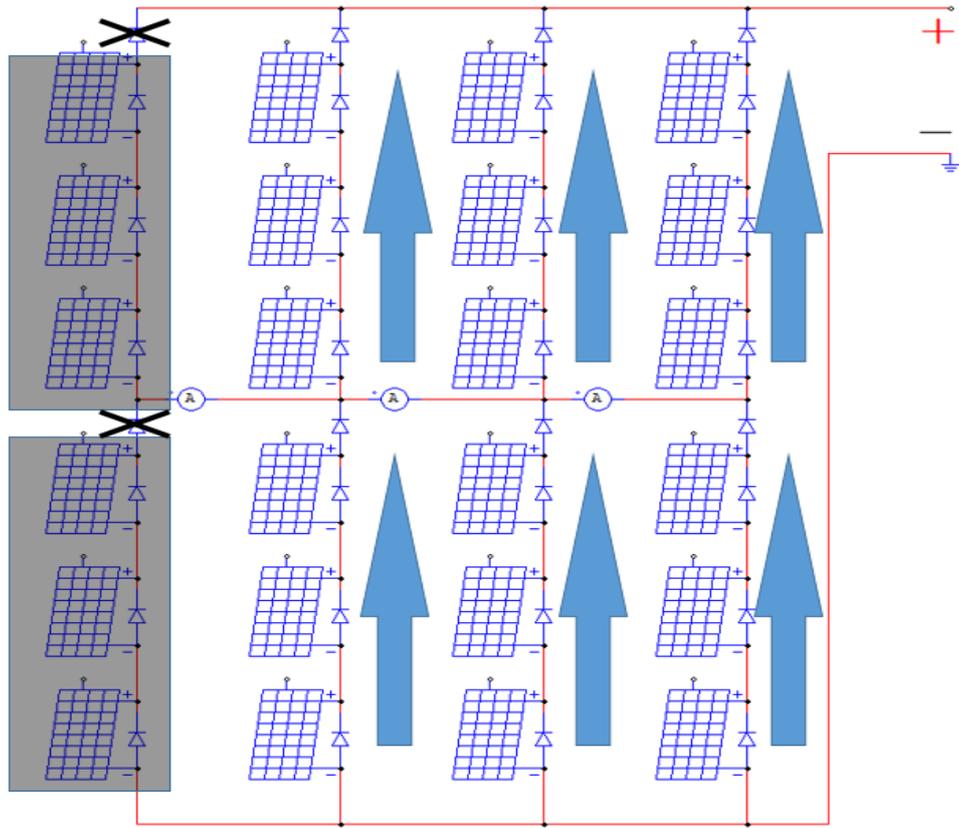
(b) 通常アレイ回路の Type I



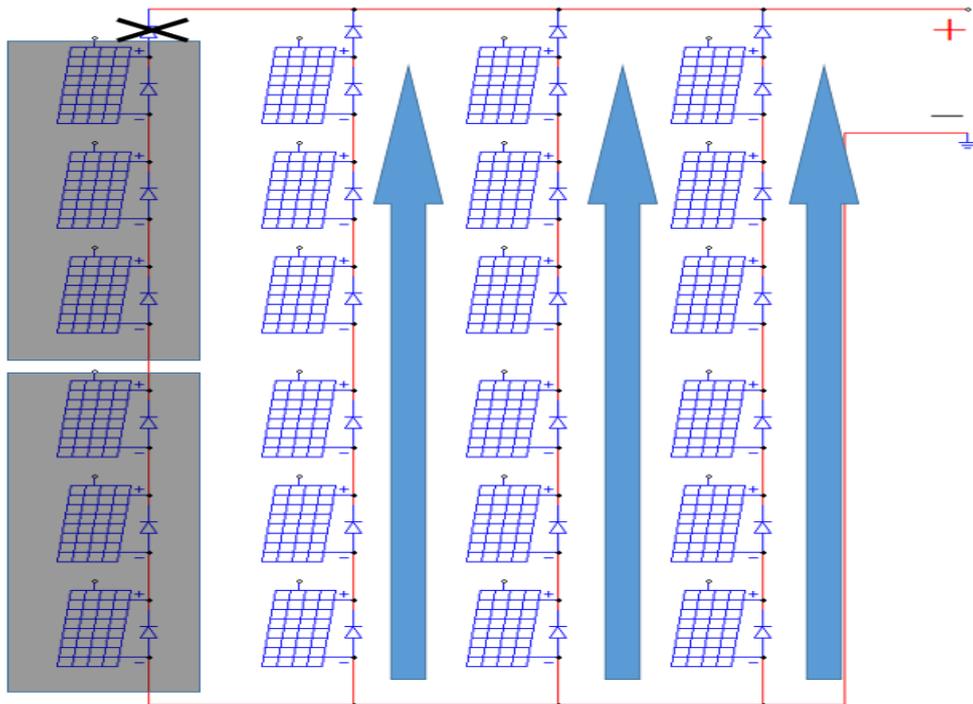
(c) 分断化アレイ回路の Type II



(d) 通常アレイ回路の Type II



(e) 分断化アレイ回路の Type III



(f) 通常アレイ回路の Type III

Fig.4-39 二位陰の各 Type の区別

まず、MPPT 制御による電圧低減効果を考えず、各タイプを分析すると、Type I と Type II は分断化の有無により大きく異なる状況となる。通常のアレイ回路の場合二つのストリングは無効になり、約 50 [%]の電力損失が生じる。しかし、分断化アレイ回路にはその問題はなく、部分陰がかからない部分は出力が得られた。Type III の効果は一つのストリングの失効と同様である。分断化の有無による P-V 特性の違いをシミュレーションし、それぞれの回路での陰位置と最大電力点の関係をまとめると Table.4-10 を得る。

Table.4-10(a). 分断化アレイ回路の二位陰発生位置と最大電力点の関係

Assemble	Bridge current	Type	MPP [W]	The remaining percentage of MPP
01	X	III	3550.4	78.60%
02	○	II	2429.3	53.78%
03	○	I	3550.4	78.60%
04	○	II	2429.3	53.78%
05	○	I	3550.4	78.60%
06	○	II	2429.3	53.78%
07	○	I	3550.4	78.60%
12	○	I	3550.4	78.60%
13	○	II	2429.3	53.78%
14	○	I	3550.4	78.60%
15	○	II	2429.3	53.78%
16	○	I	3550.4	78.60%
17	○	II	2429.3	53.78%
23	X	III	3550.4	78.60%
24	○	II	2429.3	53.78%
25	○	I	3550.4	78.60%
26	○	II	2429.3	53.78%
27	○	I	3550.4	78.60%
34	○	I	3550.4	78.60%
35	○	II	2429.3	53.78%
36	○	I	3550.4	78.60%
37	○	II	2429.3	53.78%
45	X	III	3550.4	78.60%
46	○	II	2429.3	53.78%
47	○	I	3550.4	78.60%
56	○	I	3550.4	78.60%
57	○	II	2429.3	53.78%
67	X	III	3550.4	78.60%
MPP of No shadow [W]			4517.1	

Table.4-10 (b). 通常アレイ回路の二位陰発生位置と最大電力点の関係

Assemble	Bridge current	Type	MPP [W]	The remaining percentage of MPP
01	X	III	3550.4	78.60%
02	○	II	2483.18	54.97%
03	○	I	2483.18	54.97%
04	○	II	2483.18	54.97%
05	○	I	2483.18	54.97%
06	○	II	2483.18	54.97%
07	○	I	2483.18	54.97%
12	○	I	2483.18	54.97%
13	○	II	2483.18	54.97%
14	○	I	2483.18	54.97%
15	○	II	2483.18	54.97%
16	○	I	2483.18	54.97%
17	○	II	2483.18	54.97%
23	X	III	3550.4	78.60%
24	○	II	2483.18	54.97%
25	○	I	2483.18	54.97%
26	○	II	2483.18	54.97%
27	○	I	2483.18	54.97%
34	○	I	2483.18	54.97%
35	○	II	2483.18	54.97%
36	○	I	2483.18	54.97%
37	○	II	2483.18	54.97%
45	X	III	3550.4	78.60%
46	○	II	2483.18	54.97%
47	○	I	2483.18	54.97%
56	○	I	2483.18	54.97%
57	○	II	2483.18	54.97%
67	X	III	3550.4	78.60%
MPP of No shadow [W]			4517.1	

Table.4-10 には二位陰の位置番号を 01・02・...の形式で載せている。例えば、01 の意味は Fig.4-32 に示されているように、位置 0 と位置 1 が同時に陰にかかったことである。他の組み合わせも同様の意味である。

Table.4-10(a)は分断化有りの場合、同(b)は分断化なしの通常アレイ回路の場合に出力電力がどうなるかを数値的に整理したものである。分断化アレイ回路を用いると Type I・II・III のとき、それぞれ約 78.6%・約 55 [%]・約 78.6 [%] (Table.4-10(a)) の出力が得られた。一方、分断化なしの場合には、Type II・Type III ではほぼ同様ながら、Type I では約 55 [%] (Table.4-10(b)) まで出力が低下している。

結論として、分断化ありの回路では Type I において出力が大きく改善され、それ以外の場合も悪影響を与えることはない。

なお、Table.4-11 でブリッジ電流の様子をまとめる。

Table.4-11 二位陰のブリッジ電流

<b>Datasheet of Bridge Current: 2 places shadow</b>							
Unit:A. Folw to the right is PLUS							
Assemble	Bridge Current						Type
	A1		A2		A3		
	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	Direction	Magnitude	
01	0	0	0	0	0	0	III
02	+	2.1	+	4.21	+	2.1	II
03	+	4.2	0	0	0	0	I
04	+	2.1	0	0	+	2.1	II
05	+	4.2	+	4.2	0	0	I
06	+	2.1	0	0	-	2.1	II
07	+	4.21	+	4.21	+	4.21	I
12	-	4.2	0	0	0	0	I
13	-	2.1	-	4.2	-	2.1	II
14	-	4.2	-	4.2	0	0	I
15	-	2.1	0	0	-	2.1	II
16	-	4.2	-	4.2	-	4.2	I
17	-	2.1	0	0	+	2.1	II
23	0	0	0	0	0	0	III
24	-	2.1	0	0	+	2.1	II
25	0	0	+	4.2	0	0	I
26	-	2.1	0	0	-	2.1	II
27	0	0	+	4.2	+	4.2	I
34	0	0	-	4.2	0	0	I
35	+	2.1	0	0	-	2.1	II
36	0	0	-	4.2	-	4.2	I
37	+	2.1	0	0	+	2.1	II
45	0	0	0	0	0	0	III
46	-	2.1	-	4.2	-	2.1	II
47	0	0	0	0	+	4.2	I
56	0	0	0	0	-	4.2	I
57	+	2.1	+	4.2	+	2.1	II
67	0	0	0	0	0	0	III

表より、二位陰の組み合わせ数が明らかに一位陰の Table.4-6 より多くなった。ところが、タイプによってブリッジ電流が同じ組み合わせも生じた。よって、既述の二段判断法を利用して位置が正しく判断できない可能性がある。具体的な判定法を次節に説明する。

### 4.3.3.3 二位陰の位置判定

まず、Table.4-11 のデータを三進法で整理すると Table.4-12 のようになる。

Table.4-12 二位陰の三進法判定表

A1	A2	A3	Assemble	Type
0	0	0	01,23,45,67	III
0	0	+	47	I
0	0	-	56	I
0	+	0	25	I
0	+	+	27	I
0	+	-	N/A	N/A
0	-	0	34	I
0	-	+	N/A	N/A
0	-	-	36	I
+	0	0	03	I
+	0	+	04,37	II
+	0	-	06	I
+	+	0	35	I
+	+	+	02,07,57	I&II
+	+	-	N/A	N/A
+	-	0	N/A	N/A
+	-	+	N/A	N/A
+	-	-	N/A	N/A
-	0	0	12	I
-	0	+	17,24	II
-	0	-	15,26	II
-	+	0	N/A	N/A
-	+	+	N/A	N/A
-	+	-	N/A	N/A
-	-	0	14	I
-	-	+	N/A	N/A
-	-	-	13,16,46	I&II
N/A is blank.				

Table.4-12 の Type I は三進法で判定できる。次に、Type II は他の組み合わせと区別できたが、同じブリッジ電流の組み合わせの区別出来ない。Type III は陰がない場合と似ており、唯一の相異は電力の約 25 [%] の減少である。Type I&II の相異点は電力減少の程度である。一方、Table.4-9 より、部分陰での電力減少は規則があるので、その規則を利用し二位陰の位置を判定することが出来る。まとめると、二位陰の位置判定の流れは：

1. Type 数の計算と判断
2. 三進法の計算

である。Type II と Type III の同じブリッジ電流の組み合わせの区別は本論文

で検討しない。単純に表示する。

Type II：重なり合った位置番号が振動的に示されている（例：04, 37, 04, ...）。

Type III：四つの位置番号が交替的に示されている（例：01, 23, 45, 67, 01, ...）。

二位陰の位置判定と MPPT 動作とのフローチャート図を Fig.4-40 に示す。

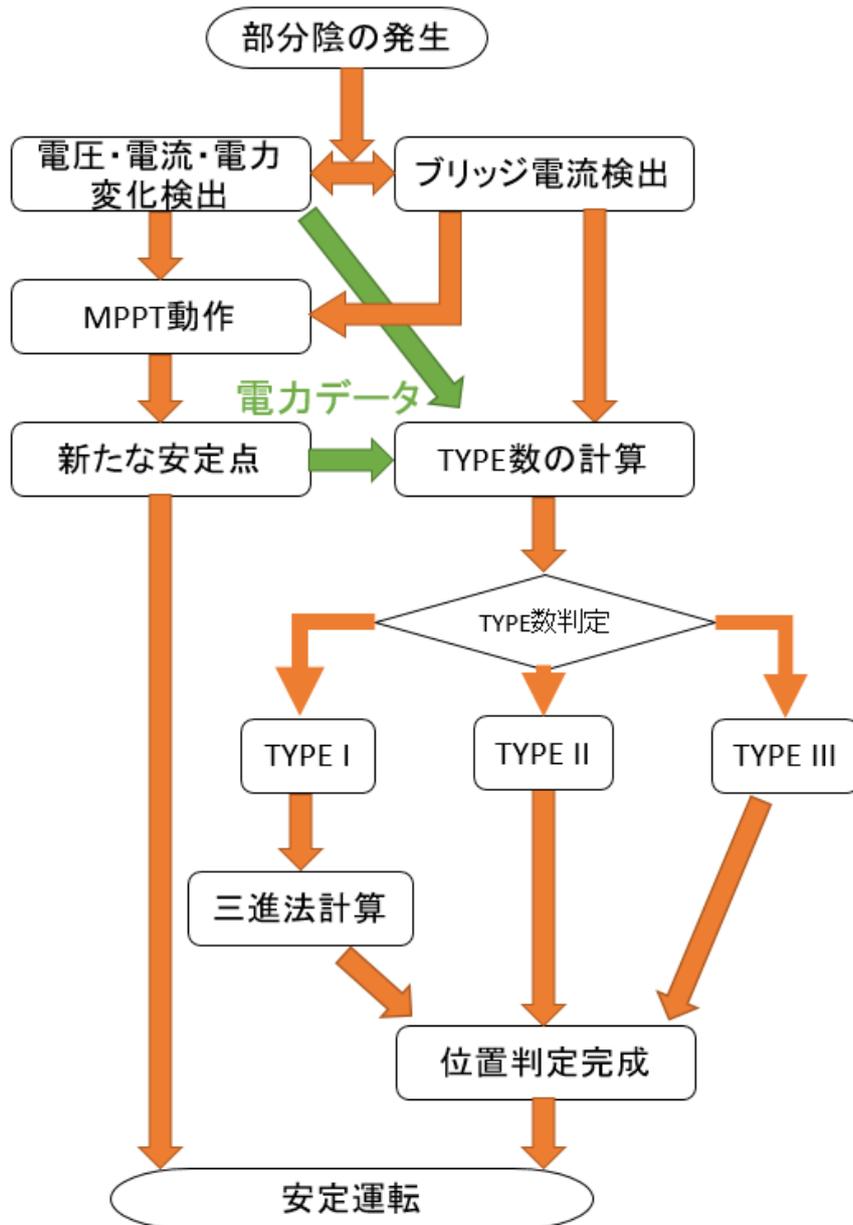


Fig.4-40 二位陰の判定と MPPT の動作とのフローチャート図

二位陰の判定は一位陰の判定より複雑になる。ブリッジ電流の検出とアレイ回路の電圧・電流の変化検出が MPPT アルゴリズムのトリガーである。判定は

MPPT の動作が完成してからすることである。新たな最大動作点に安定してから、ブリッジ電流を取り出し、部分陰の位置判定を行う。

判定アルゴリズムには電力データの比較が必要であるため、部分陰が発生前後の電力データを採り、TYPE 数の計算を行う。その後ブリッジ電流の様子により、部分陰の位置を判定する。

#### 4.3.3.4 零・一・二位陰の総合位置判定

既述の一位陰の判定法と二位陰の判定法より、実際の部分陰に対応するには、一位陰と二位陰とを総合的に判定する必要がある。ここで一位陰・二位陰位置判定の流れをもう一度整理する。

一位陰：

1. 三進法の計算
2. ブリッジ電流の大きさからのパターン判定

二位陰：

1. Type 数の計算と判断
2. 三進法の計算

二つの流れを見ると、三進法の計算が必須である。そして、Type 数の判定と電流の大きさの判定は、一位陰では三進法の後、二位陰では前になっていた。そして、Table.4-7 の三進法判定表で一位陰と二位陰の位置を整理すると、Table.4-13 の通りである。

Table.4-13 一・二位陰の総合的な三進法判定表

A1	A2	A3	Assemble	Number of shades	Type
0	0	0	01,23,45,67	2	III
0	0	+	47	2	I
0	0	-	56	2	I
0	+	0	25	2	I
0	+	+	27	2	I
0	+	-	N/A	N/A	N/A
0	-	0	34	2	I
0	-	+	N/A	N/A	N/A
0	-	-	36	2	I
+	0	0	03	2	I
+	0	+	04,37	2	II
+	0	-	06	2	I
+	+	0	35	2	I
+	+	+	0,7,02,07,57	1&2	I&II
+	+	-	5	1	N/A
+	-	0	N/A	N/A	N/A
+	-	+	N/A	N/A	N/A
+	-	-	3	1	N/A
-	0	0	12	2	I
-	0	+	17,24	2	II
-	0	-	15,26	2	II
-	+	0	N/A	N/A	N/A
-	+	+	2	1	N/A
-	+	-	N/A	N/A	N/A
-	-	0	14	2	I
-	-	+	4	1	N/A
-	-	-	1,6,13,16,46	1&2	I&II
N/A is blank.					

その総合判定の考えは：

最初に Type 数により一位陰と二位陰を分離し、その後三進法で細かく部分陰の位置を判定し、ブリッジ電流の大きさよりパターンを判定すればよいと考えられる。

すなわち、総合判定の流れは：

1. Type 数の計算と判定
2. 三進法の計算
3. ブリッジ電流の大きさからのパターン判定

とすれば良い。こうして Table.4-12 と Table.4-13 に色付きで示す多数のパターンの判別も可能となった。

零・一・二位陰の位置判定と MPPT 動作とのフローチャート図を Fig.4-41 に示す。

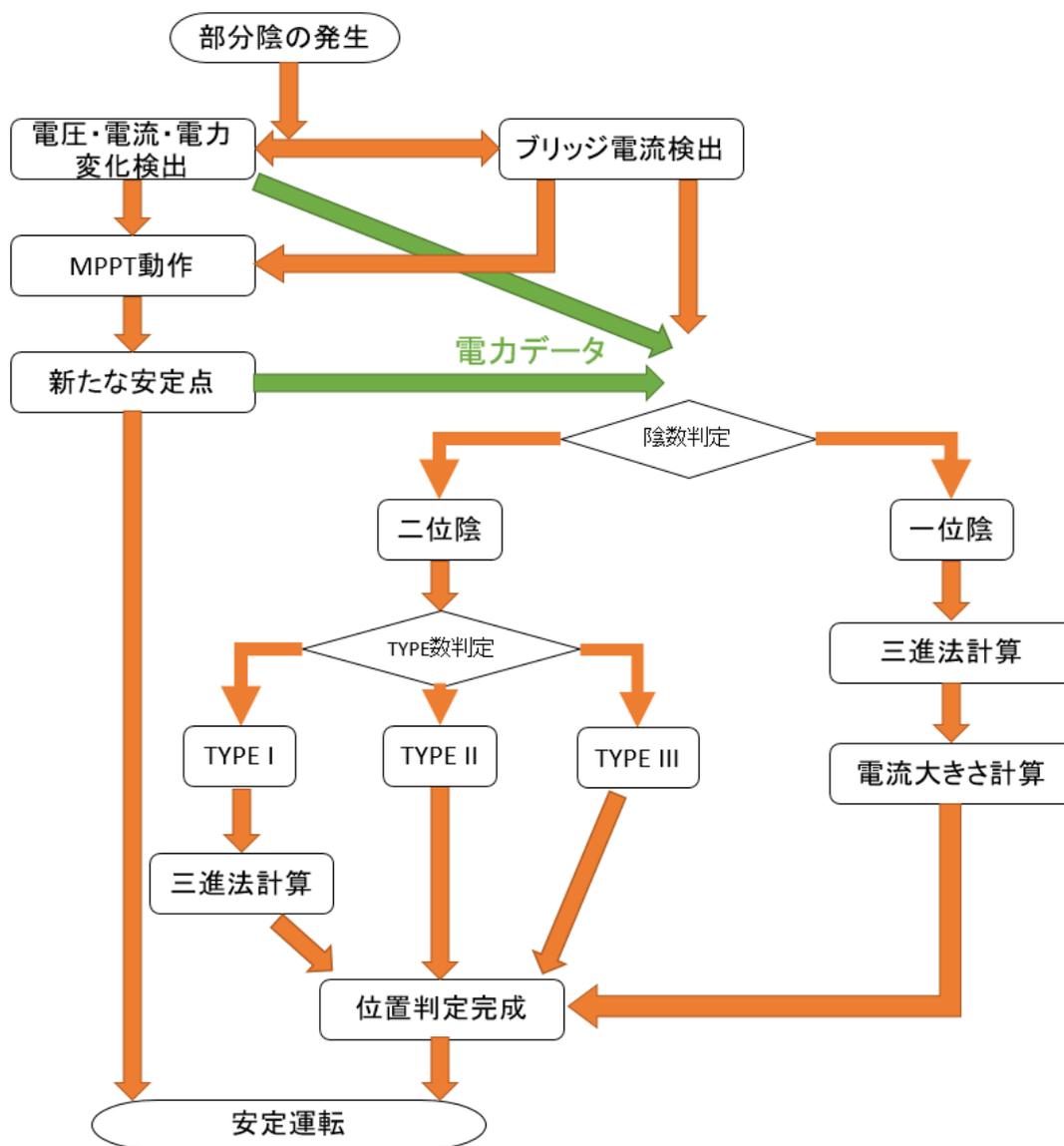
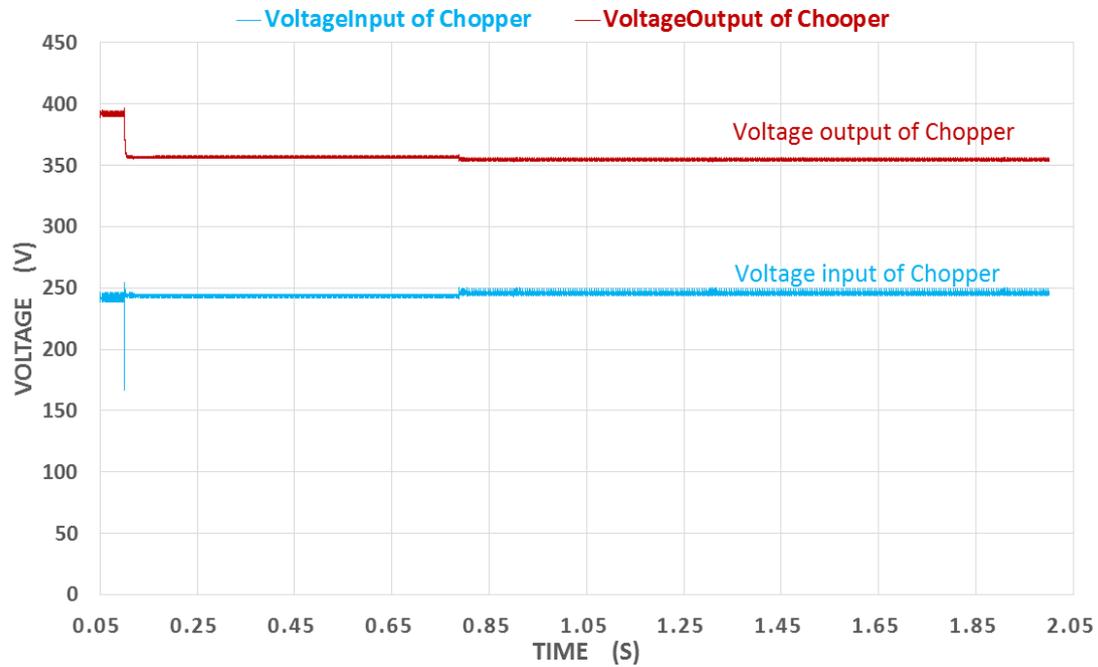


Fig.4-41 零・一・二位陰の判定と MPPT の動作とのフローチャート図

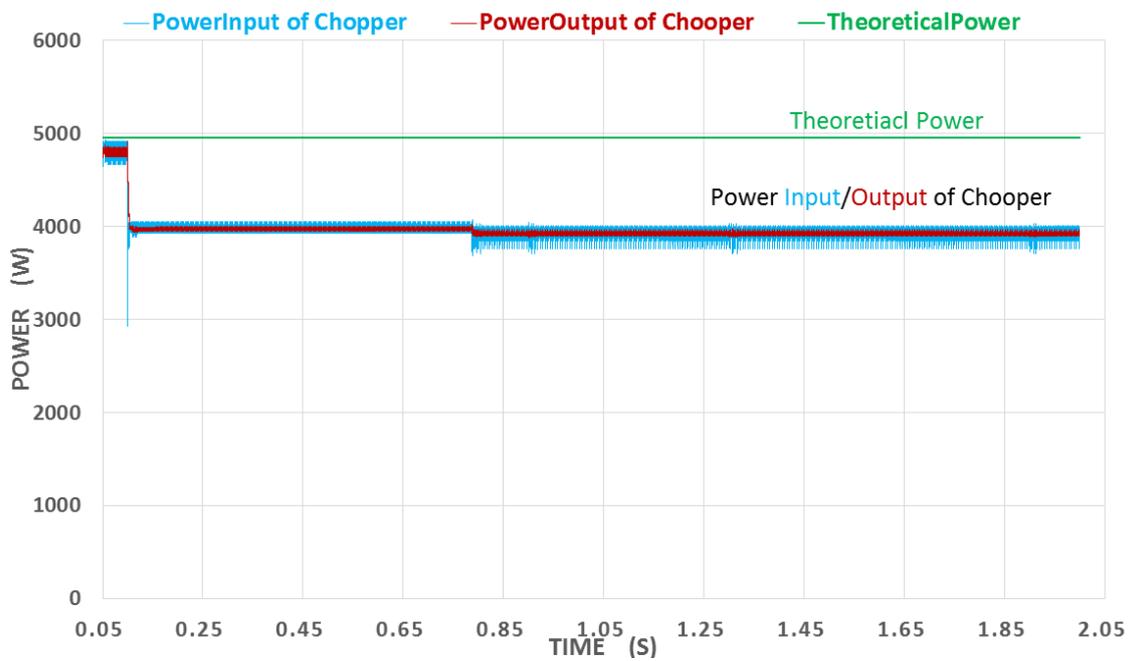
零・一・二位陰の判定は前述の判定手法らをまとめたものである。MPPT のトリガーは二位陰と同じく電圧電流電力の変化検出とブリッジ電流検出である。陰数の判定にも同じくアレイ回路の出力電力の比較が必要である。電力の低下程度から陰数・TYPE 数の区別をし、三進法等の手法で、具体的な位置を算出・判定する。

#### 4.3.4 安定している放射照度での部分陰位置判定

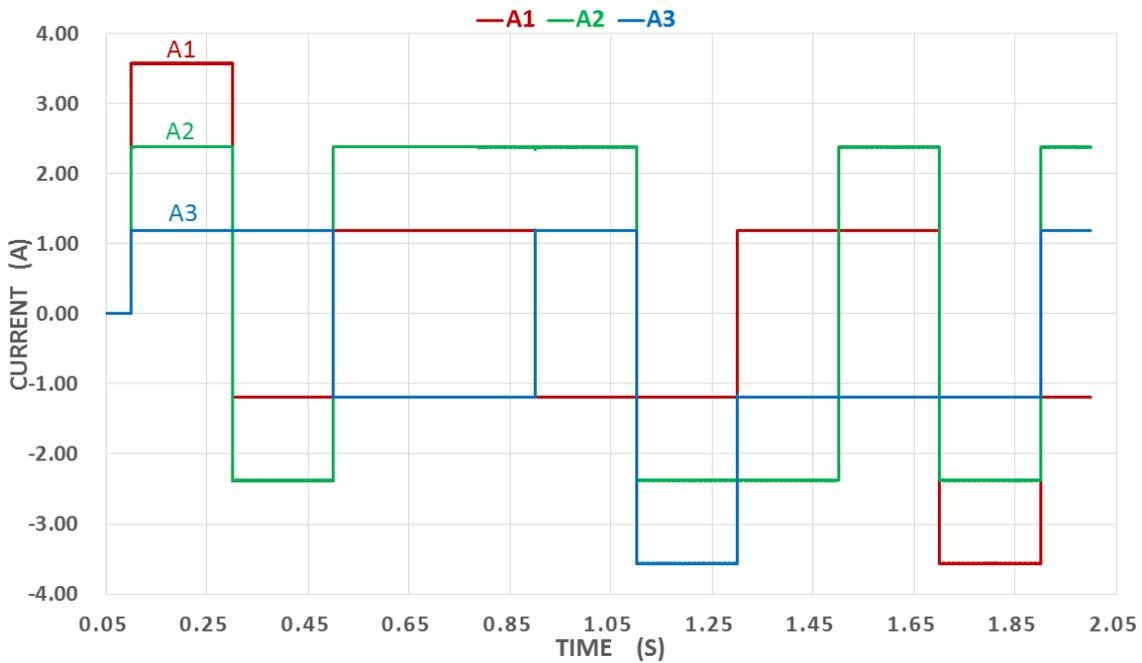
##### 4.3.4.1 ランダム一位陰



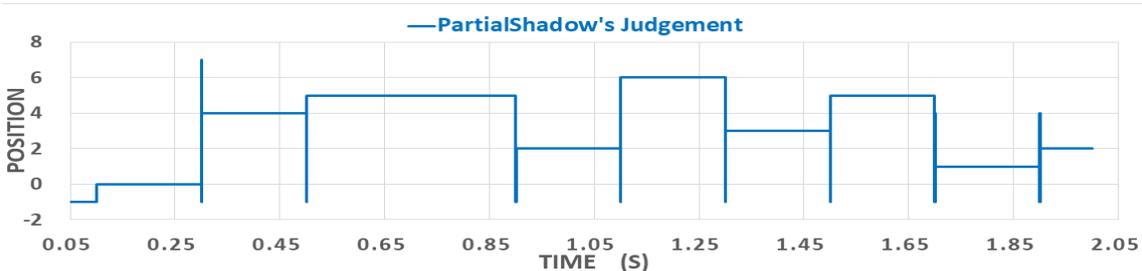
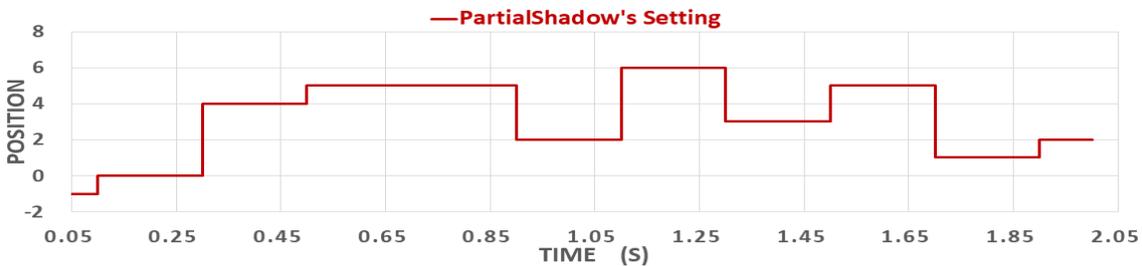
(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) ブリッジ電流



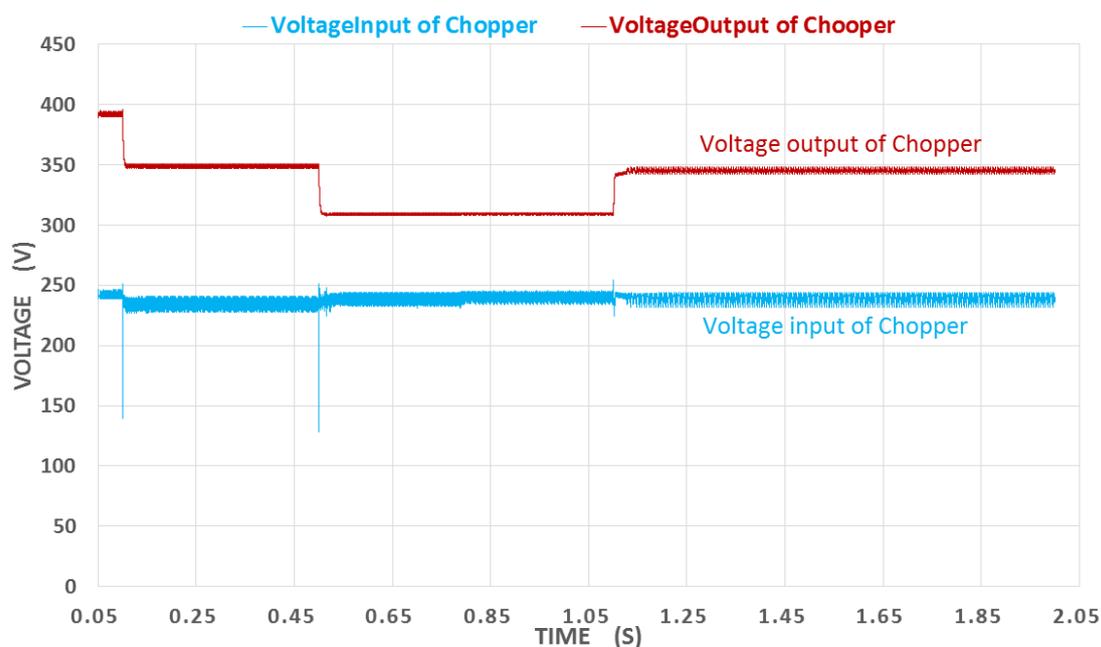
(d) 部分陰の位置設定と位置判定結果

Fig.4-42 ランダム一位陰の位置判定

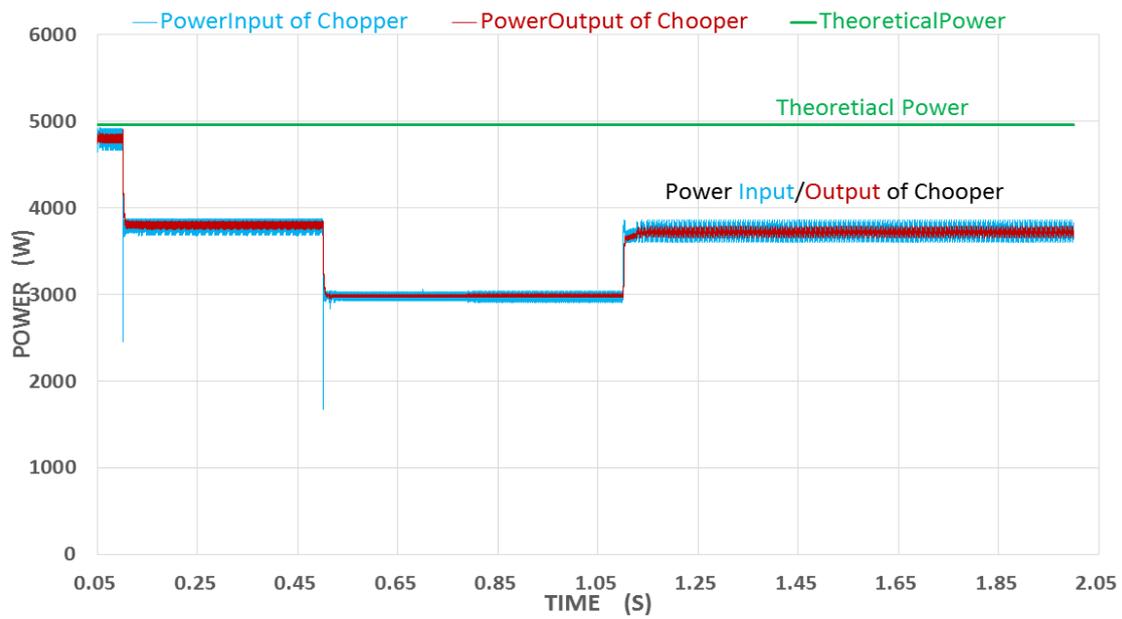
一位陰のみをシミュレーションすると、Fig.4-42 のような結果が得られる。(a)はランダム部分陰をかけるときの電圧出力の変化である。時間軸で、0.05 秒から 0.1 秒までは部分陰がなしの状態、0.1 秒から 2 秒までは部分陰をかけている。(b)は電力の出力である。一位陰のため、電力の変化は少なかった。(c)はブリッジ電流である。波形を見ると、陰の位置が変化していたと同時にその電流の方向と大きさも変化していたことが分かった。(d)は陰の位置をプログラムで判断した結果である。上の枠は一位陰の設定場所で、下の枠は位置を判定した結果

である。ここで0.05~0.1秒の範囲にある-1は部分陰なしのことを意味している。0.1秒以後安定できる数値が0から7まで変化しており、陰の位置を正しく判断したと言える。その他に場所を示すときオーバーシュートが多少発生している。それは陰の位置が変化する瞬間にブリッジ電流の様子を安定にするまで少々時間が必要であり、その不安定なブリッジ電流データを利用・計算するとオーバーシュートになるわけである。位置の番号は Fig.4-37 に示した通りである。ここで想定したケースにおいてはブリッジ電流を利用し一位陰の位置判断が正しくできた。

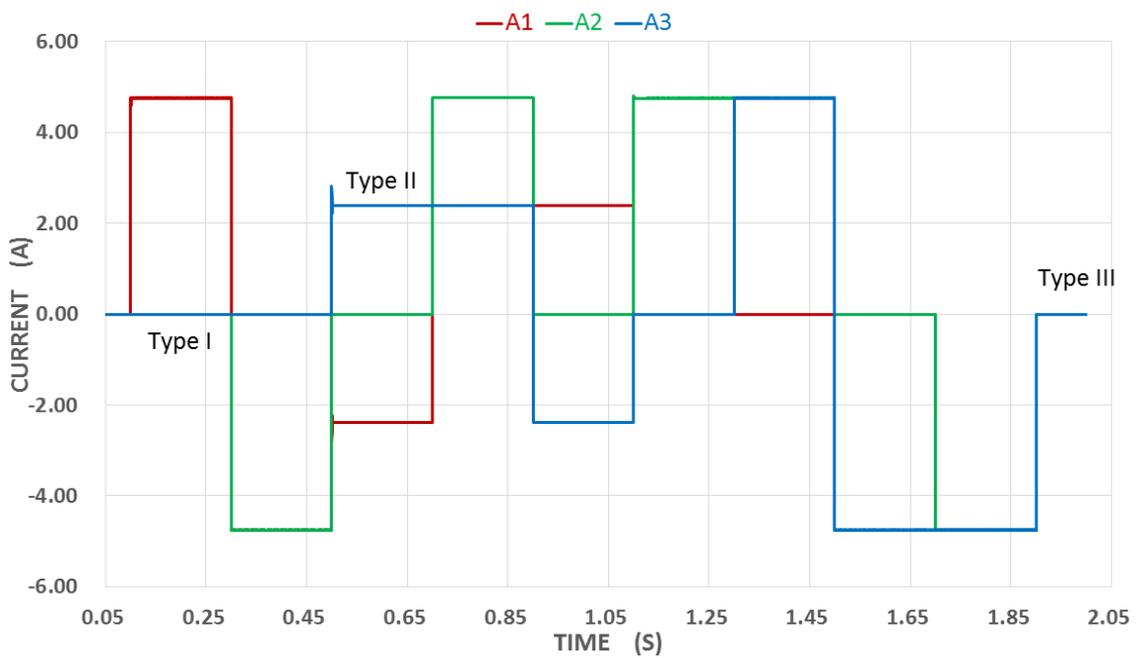
#### 4.3.4.2 ランダム二位陰



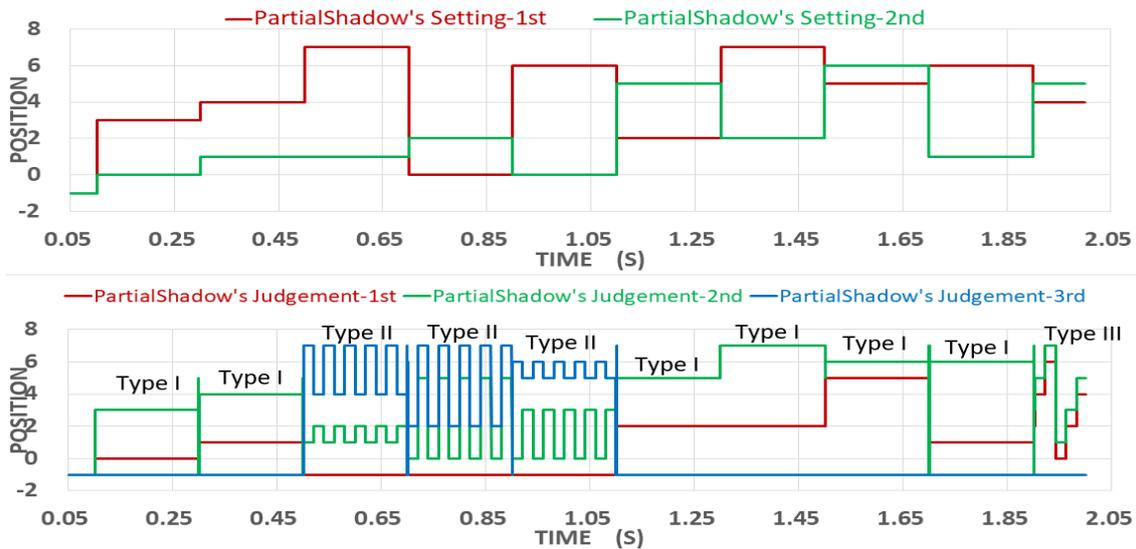
(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) ブリッジ電流



(d) 部分陰の位置設定と位置判定結果

Fig.4-43 ランダム二位陰の位置判定

同様の方法で二位陰のみをシミュレーションし、有効性を検討した。得られた結果は Fig.4-43 に示す。一位陰の Fig.4-42 と比べると、二位陰の Fig.4-43 の変化が多くなった。Fig.4-42(a)と(b)の電圧と電力変化は単純に低下したが、Fig.4-43 の(a)と(b)には複雑な過程を経て変化した。両方の(c)を比較すると、Type I と Type II の場合にはブリッジ電流の変動は特に激しいとはいえなかったが、変化の直後に少々過渡現象が確認できる。Type III の場合には前述のように、ブリッジ電流が生じていない。(d)は二位陰位置の判定結果である。上の枠は二位陰の設定、下の枠は陰位置を判定した結果である。

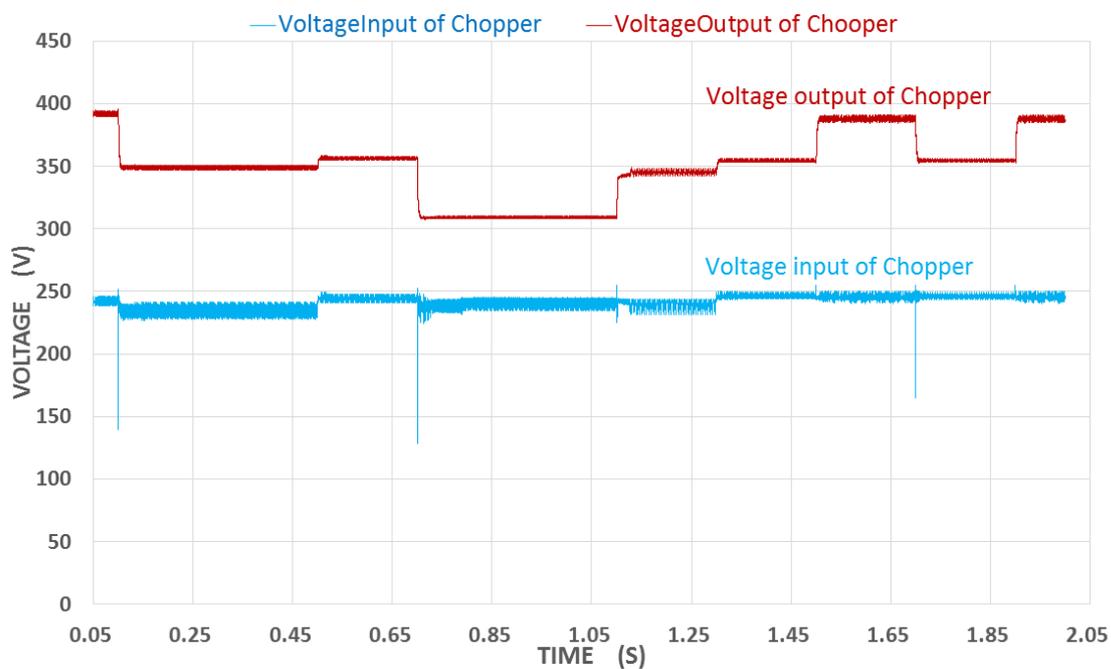
シミュレーションの結果を見ると、Type I の判定は陰の設定と一致した。ところが、Type II と III の様子は陰の設定と一致していない。その原因は前述の通り、重なり合った Type II の二位陰には区別できないものがあるためであって、4.3.3.3 節に記したように判定結果を表示した：

Type II：重なり合った位置番号が振動的に示されている（例：04, 37, 04, ...）。

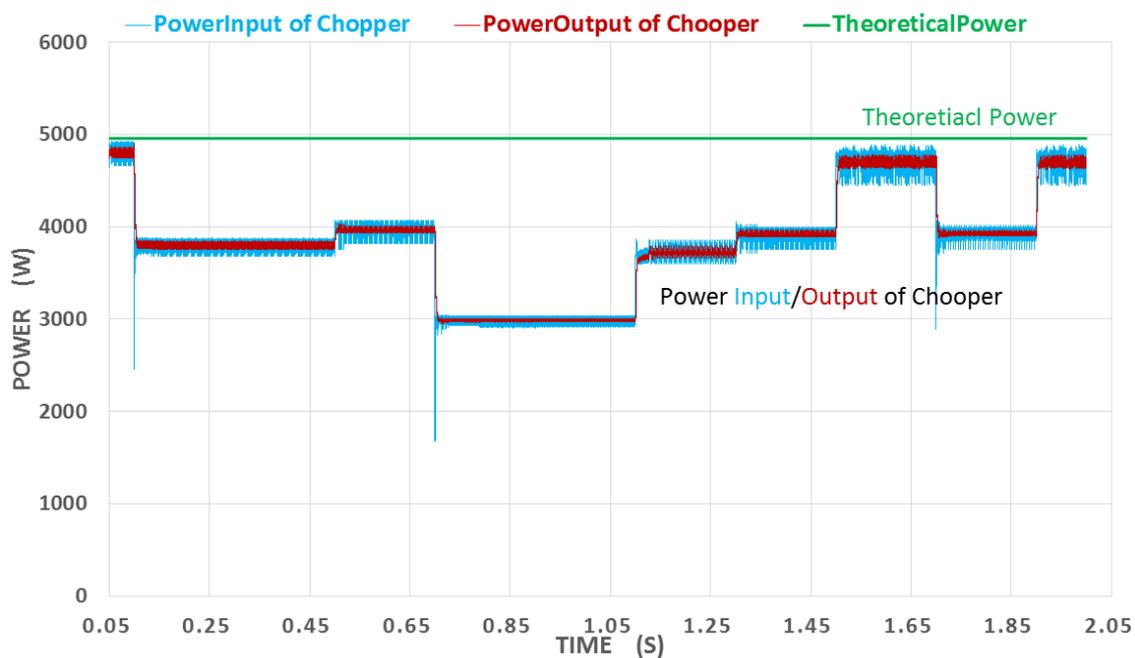
Type III：四つの位置番号が交替的に示されている（例：01, 23, 45, 67, 01, ...）。

正確な位置番号は必ず判定結果に含まれている。以上より、本システムは二位陰の位置判断が、ほぼ正確にできると考えられる。

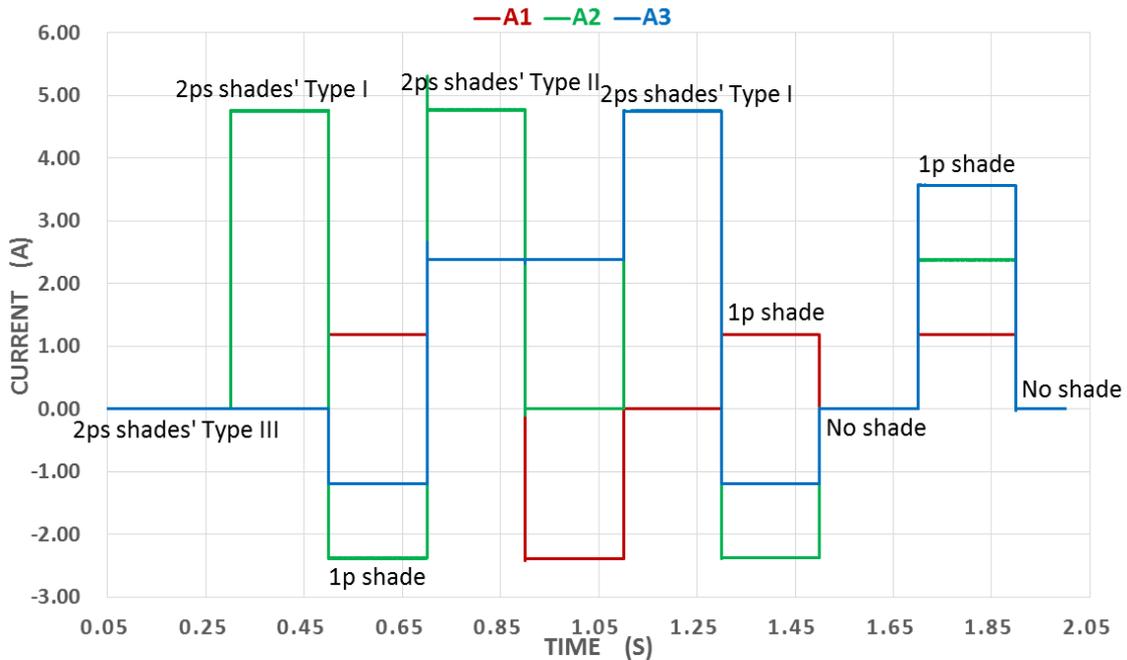
### 4.3.4.3 ランダム零・一・二位陰



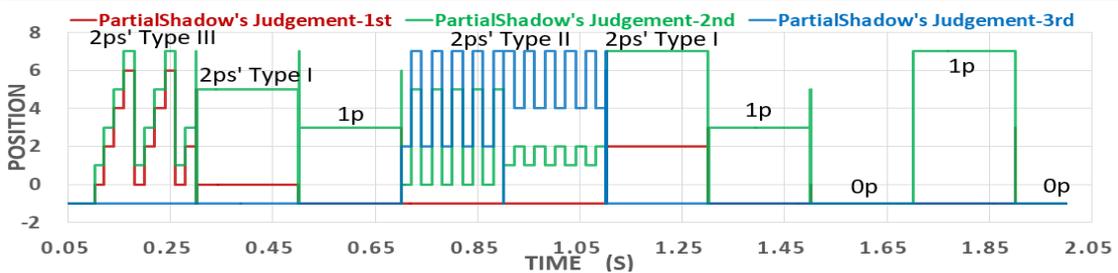
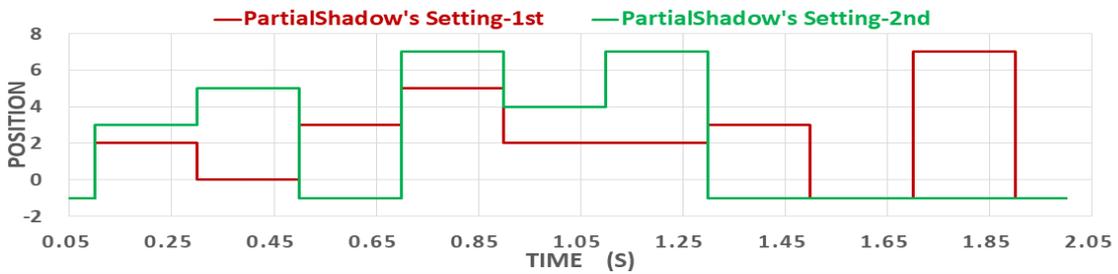
(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) ブリッジ電流



(d) 部分陰の位置設定と位置判定結果

Fig.4-44 ランダム零・一・二位陰の位置判定

本節は 4.3.3.4 節の理論に従い、一・二位陰の総合判定の有効性をシミュレーションにより検討する。結果は Fig.4-44 に示す。部分陰は数量・位置共にランダムに発生させた。結果より、本システムは総合的な部分陰位置判定ができたと考えられる。

## 4.4 技術の一般化に関する検討

一般的に住宅用太陽光発電システムは設置する場所の面積に制限され、規模として 10 [kW]未満の場合が多い。1 [kW]～10 [kW]規模で太陽電池モジュールの枚数を試算すると：

一枚 300 [W]の太陽電池モジュールを用いる場合：4～34 枚

一枚 200 [W]の太陽電池モジュールを用いる場合：6～50 枚

本研究のシミュレーションでは 200 [W]の太陽電池モジュールを使用する。その中位数の 24 枚を研究例とすると、発電システムは 5 [kW]・24 枚太陽電池モジュールで構成するものである。建設用面積が 30 [m<sup>2</sup>]と想定する。一戸建ての住宅の屋根に設置するのは十分可能であると考ええる。

本研究では実験を行った。しかし、実験では室内の LED 光源を利用したので、有用面積が 800 [mm]×500 [mm]しかなかった。よって、面積が小さい 7 [W]級の太陽電池モジュールで構成するアレイ回路で実験を行い縮小規模においてのみ実験的検証を実施した。

## 第5章

# 安全性向上に関する研究

## 5.1 太陽光発電システムの安全性向上の必要性

第2章の背景に述べたように太陽光発電システムは日射さえあれば発電するため、火災や自然災害時には障害となる場合がある。たとえ災害でシステムが破壊されても太陽電池モジュールは、そのままでは発電停止しない。そのため、発電された電流が破壊されたアレイの配線から漏れ、短絡・出火や感電事故の原因になる。一方、発電システムを点検する際にも直流配線内部を無電圧にしたいという現場ニーズは大きい。

背景に述べた報道や公的機関の報告書にも見られるように太陽光発電システムが破損・浸水することが原因で太陽電池モジュールが漏電したり、消防隊員が感電したりなどの事故はあとを絶たない。背景にある複数の事故例より判るように、災害時に太陽電池アレイの配線内部を無電圧とする必要性があると考えられる。この問題について研究機関や産業界は対策を求めているが、決定的な解決案が得られていない。

よって、本論文では太陽電池モジュールの常にある出力電圧を遮断する装置を提案し、その開発の経緯や検証記録をまとめる。

## 5.2 提案手法

提案した遮断装置の目的は事故や災害など電圧の発生が不要な場合に太陽電池モジュールの出力を遮断することである。すると二次災害の発生が防げると考える。このためには遮断装置は以下の各特徴を持つ必要がある：

1. 不要時にアレイ回路の直流電圧を遮断する。緊急時と災害時に発電システムを保護すること。
2. 制御用ケーブルを極力増やさないように電力線搬送通信技術 (PLC) を活用していること。
3. 自己消費電力を極力小さく抑えていること。
4. 制御信号に対する感度を最適化し、バランスの良い回路要素を設定すること。
5. 太陽電池アレイ回路に複数個の遮断装置を配置し、直列・並列運転を実現すること。

### 5.2.1 提案回路の構成

上述で通り不要時、緊急時に太陽電池アレイ回路配線内の直流電圧を遮断すれば、発電システムの安全性が大幅に向上できる。よって、遮断スイッチを各モジュールに設置すれば良いと考えられる。本論文ではその遮断スイッチを遮断装置と呼ぶ。

本研究で開発した遮断装置を備えた発電システムの概要図を Fig.5-1 に示す。想定上全てのモジュールに遮断装置 1 個を付けるものとする。

青い部分は太陽電池アレイ回路に元々設けられている部分である。

緑色の部分は制御信号発生源である。ルーフトップ式太陽光発電システム 1 基に信号源 1 個を使用することを想定する。ここに電力線搬送通信技術を利用する。制御信号を直流配線に載せ、遮断装置がその信号をピックアップする。信号が存在する範囲を制限するために、並列共振回路を使用する。すると、制御信号があれば、オレンジ色の遮断装置のスイッチが閉じ、制御信号が消失するとスイッチが開放する機能が実現できる。複数の遮断装置付太陽電池モジュールを直並列接続すると、通常のアレイ回路が構成できる。

遮断装置内部には 5 つの機能回路がある。

●回路を遮断する部品：スイッチ

●Fig.5-1 遮断装置筐体内部の 1 と表記される回路：

制御信号の受信・諧調部分である。制御信号を直流配線からピックアップしてから、ノイズを除去し制御信号を増幅する。

●Fig.5-1 遮断装置筐体内部の 2 と表記される回路：

制御信号の整流・スイッチを動作させる部分である。精練した制御信号を

直流に整流し，スイッチを投入させる。

●Fig.5-1 遮断装置筐体内部の3と表記される回路：

制御信号の転送部分である。複数の遮断装置を直列運転できるように1のフィルターで精錬した制御信号を次の装置に転送する。

●Fig.5-1 表記されない回路：

仮想接地電源回路である。遮断装置の自己消費電力を節約するとともに，フィルターに正負電源も要求されるので，遮断装置用の電源回路を開発する。

遮断する対象として本論文で想定するのはモジュールで発生する直流電圧である。想定上本装置はパワーコンディショナーが停止して無負荷となった条件で動作するため，電流の遮断機能は不要である。

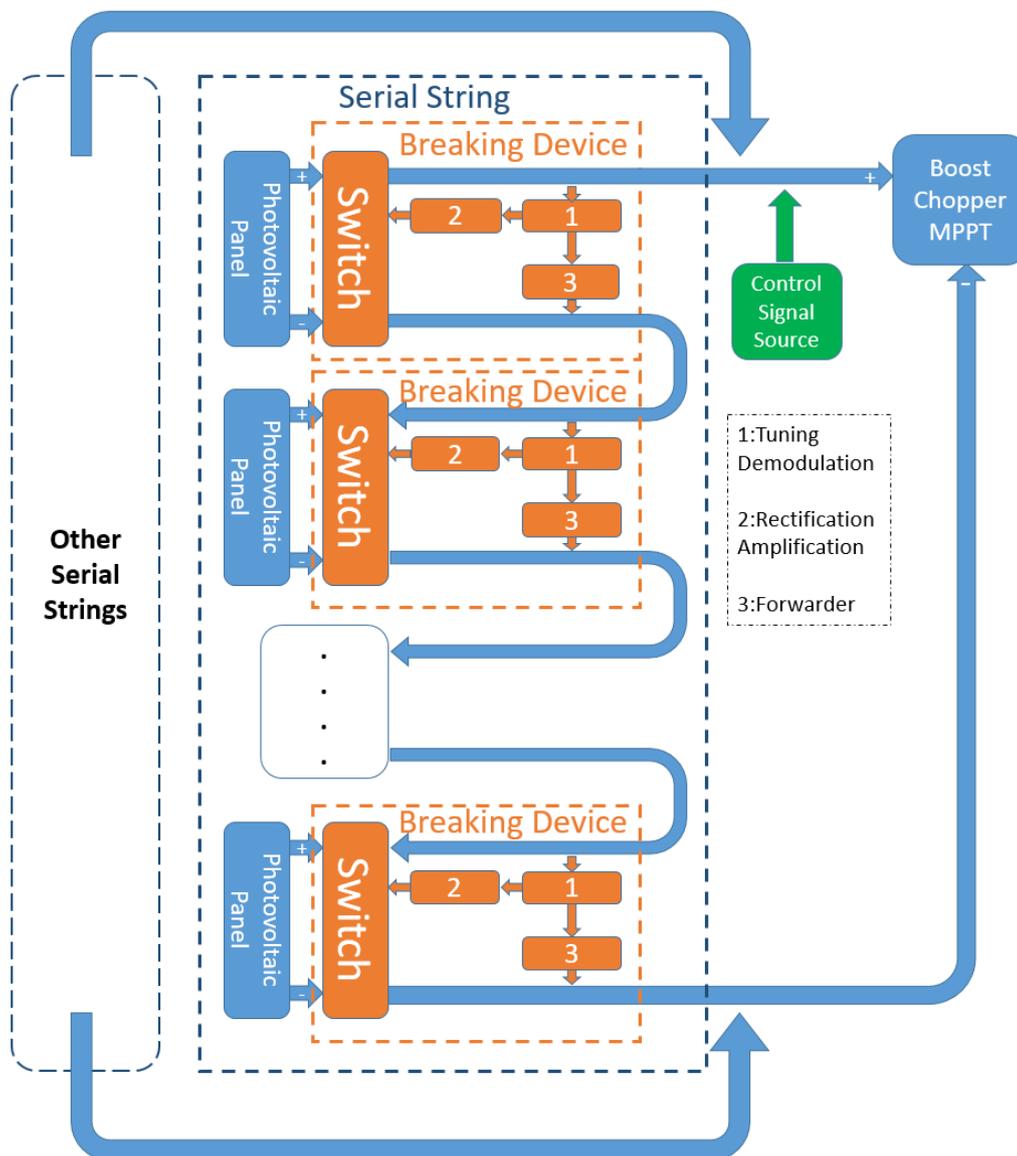


Fig.5-1 太陽電池アレイ回路での遮断装置の位置づけ

### 5.2.2 遮断装置の電力転送効率と自己消費

前述のように、本遮断装置は能動的な装置であるので、動作する際に太陽電池モジュールの発電電力の一部を消費する。よって、出力できる電力は入力電力よりも小さく、その比率を以下では電力転送効率という。

遮断装置の電力転送効率に影響するものはスイッチのタイプである。現在よく利用される電力スイッチを比較した結果を Table.5-1 にまとめた。

Table.5-1 スwitchの制御方法及び導通抵抗

スイッチ	制御方法	導通抵抗
BJT	Base current	High(10~100 [ $\Omega$ ])
MOSFET	Gate voltage	Normal(1~10 [ $\Omega$ ])
Relay	Coil current	Low(About 0 [ $\Omega$ ])

シリコン系太陽電池モジュールの出力電流が直流かつ数アンペア程度でやや大きい。そのため、遮断スイッチの導通抵抗が低いほど直流電流での熱損失が軽減でき、装置の電力転送効率が高くなる。すると、遮断装置の遮断スイッチは低い導通抵抗のもとを選定すべきである。

また、各スイッチの制御方式により、MOSFET はゲート電圧の有無によって制御するのに対し、リレーとトランジスタの制御方式がコイル電流とベース電流の有無によって制御するので、低消費電力という特徴を有するのは MOSFET である。ただし、MOSFET 方式では放熱や機械的な設計が複雑であるのに対し、リレーにはこの問題は特にない。

本遮断装置には高速かつ高頻度のスイッチング動作は不要である。導通抵抗の視点や動作の特徴などを総合的に検討すると、リレー方式のほうが適していると判断される。具体的にリレーの消費電力とは電磁コイルの動作電流とその電流を発生する定電流源という駆動回路の熱損失である。

原理的にリレーの動作には常に一定の電流が必要であるが、通常太陽電池モジュールは材料特性・最大電力点追従 (Maximum Power Point Track, 略称 MPPT) や陰などの影響で、太陽電池モジュールの出力電圧の変化範囲が非常に広い。もしリレーのコイルに太陽電池モジュールからの直流電圧を直接に印加すると、太陽電池モジュールの電圧の変動でコイルに流れる電流が変化してしまい、リレーの開閉が不安定となる。その問題を解決するために、太陽電池モジュールの出力電圧が変動してもコイルに流れる電流を安定化する駆動回路が必要である。その回路を Fig.5-2 に示している。

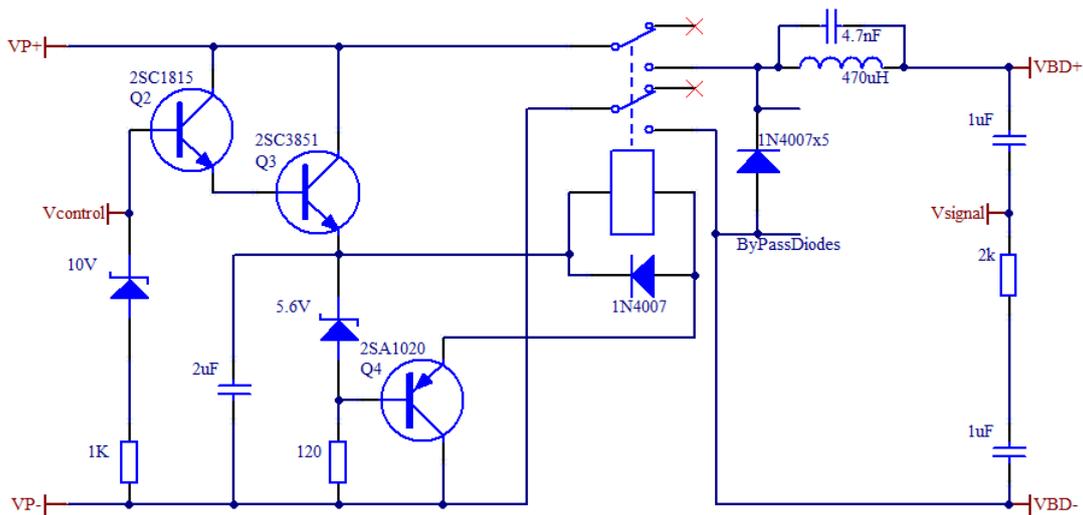


Fig.5-2 リレーの駆動回路

図面上の VP は太陽電池モジュールの出力電圧で、VBD は遮断装置の出力電圧である。Vsignal がピックアップ回路からの制御信号電圧で、Vcontrol が制御信号の処理で得たリレーの駆動信号である。

以下、本回路の動作機構を述べる。制御信号が通じると、トランジスタ Q2 と Q3 で構成したトランジスタペアが導通される。電流がリレーのコイルを通して流れ始める。リレーは所定のコイル電流でしか動作しないために、コイルの元に 5.6 [V]ツェナーダイオードと Q4 と 120 [Ω]抵抗でできた定電流源を設置する。電流量の設定をリレーのデータシートを参照して決めた (例とするリレーは定格電圧 5 [V]・定格電流 140 [mA]・内部抵抗 36 [Ω]のもの)。直列分圧の定理により、Fig.5-2 の電力トランジスタ Q3 にかかる余剰電圧は：

$$V_{Q3} [V] = (\text{電源電圧} - 5 - 0.6) \dots\dots\dots (5-1)$$

であり、電力の熱損失は式(5-2)になる。

$$P_{loss} [W] = (\text{電源電圧} - 5 - 0.6) \times 0.14 \dots\dots\dots (5-2)$$

式(5-2)により、電源電圧が高いほど Q3 上の電力熱損失も高くなるのが分かる。極端な場合を試算しても、Q3 に電力増幅用の 2SC3851A を使用し、その上に放熱板もつけると、そのトランジスタは 25 [W]の最大電力熱損失に耐えられる (データシートより)。式(5-2)で計算すると、25 [W]の熱損失が発生する場合の電源電圧は 184 [V]となる。現在のシリコン製太陽電池モジュールの最大出力電圧は 60 [V]を超えることは少ないので、式(5-2) で 60 [V]の場合の電力熱損失を計算すると 7.6 [W]となる。

次に電力転送効率の計算例として、定格電力 400 [W]・定格最大電力点電圧 60 [V]の太陽電池モジュールで計算すると、電力トランジスタの電力損失が 7.6 [W]、リレーの電力損失が 0.7 [W]で、理論上での最大転送効率は

$(400 \text{ [W]} - 7.6 \text{ [W]} - 0.7 \text{ [W]})/400 \text{ [W]} = 97.9 \text{ [%]}$ という高値となる。比較検討として、同じく電力を転送する装置の一つである変圧器の場合に、電力容量が500 [VA]級の単相変圧器の効率は88~94 [%] (実験の実測値) である。これより、遮断装置の最大転送効率は同容量の単相変圧器より高いものであると判断できる。

### 5.2.3 制御信号周波数の選択

太陽光発電システムの直流回路には常にリップル電圧が存在している。それは最大電力点追従 (MPPT) 機能を実行する DC-DC コンバータの動作によるものである。コンバータ内部に大きなインダクタが存在するので、実際に直流回路に存在するリップル電圧の波形はノコギリ波である。

現在, 最もよく利用されるスイッチング素子としてシリコン製 IGBT がある。その素子の特性より推奨されるキャリア周波数の範囲は 10 [kHz]~20 [kHz] である。本論文ではシリコン製 IGBT を使用する DC-DC コンバータを検討対象として、仮にコンバータの動作で直流入力側に得られるリップル電圧 ( $V_{p-p}=10 \text{ [V]} \cdot f=20 \text{ [kHz]}$ ) のノコギリ波) をフーリエ変換すると式(3)になる。

$$f(t) = V_{DC} + \frac{V_{p-p}}{2\pi} [\sin(\omega t) - \frac{1}{2}\sin(2\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) - \frac{1}{4}\sin(4\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) - \frac{1}{6}\sin(6\omega t) + \dots] \dots\dots\dots(5-3)$$

$$(\omega \text{ [rad/s]} = 2 \times \pi \times 20 \text{ [kHz]})$$

各高調波の最大値を計算すれば以下の通りである。

- 基本波 : 3.18 [V]      第 2 高調波 : 1.59 [V]
- 第 3 高調波 : 1.06 [V]      第 4 高調波 : 0.80 [V]
- 第 5 高調波 : 0.64 [V]      第 6 高調波 : 0.53 [V]
- 第 7 高調波 : 0.45 [V]      第 8 高調波 : 0.40 [V]

各高調波対リップル電圧最大値の割合を計算すると、第 5 高調波以後の割合は 12.8 [%]以下になる。また、各高調波対直流分の割合については、直流分の電圧は太陽電池アレイ回路の直流電圧で、数十 V 程度から数百 V 程度である。よって、その割合が極めて低く、無視できると考える。したがって、キャリア周波数の高調波による不具合を防ぐために、制御信号周波数は第 5 高調波以降にしたほうが良いと判断でき、本研究では 100 [kHz]を制御信号の周波数とする。

### 5.2.4 受信側の制御信号処理

前述で太陽電池アレイ回路には DC-DC コンバータからのリップル電圧が存在していることを検討した。もし提案した遮断装置がそのリップル電圧で誤動作すると、本来の設計目的が達成できない。よって、直流回路から得られる様々

な信号をフィルターに通し、指定された周波数に近くの制御信号のみを選択的に取り出すことが必要になる。

普段そのことを達成する手法はフィルターである。フィルターと言えば、ローパス・ハイパス・バンドパス・バンドリジェクト及びオールパス等がある[6-1]。そして、電源なしの LC 回路構成と電源ありのオペアンプ回路構成もある[6-2]。本稿では、受動及び能動のフィルター回路総計 3 種類を比較検証する。

達成したい目的は受信側とする遮断装置が制御信号レスポンスの範囲を縮小し、一定的な周波数しか動かないようにすることである。

#### 5.2.4.1 フィルターの選択とその特性

よく使われているフィルターはローパス (LPF)・ハイパス (HPF)・バンドパス (BPF)・バンドリジェクト (BRF) 及びオールパス (APF) である。各種類の概念と特徴は以下の用になる：

**LPF**：カットオフ周波数（遮断周波数  $f_0$ ，一般的な定義はパスバンド（通過帯域）ゲインから 3db 低下する点に対する周波数という）より低い周波数が通過できるフィルターである。基礎的なフィルターである。

**HPF**：カットオフ周波数より高い周波数が通過できるフィルターである。基礎的なフィルターである。

**BPF**：とある範囲内の周波数しか通らないフィルターである。通常な構成は LPF と HPF の直列することである。

**BRF**：とある範囲内の周波数が阻まれるフィルターである。通常な構成は LPF と HPF の並列することである。

**APF**：全ての周波数が通れるが、位相を線形的に変化するフィルターである。

以上の説明の中に、目的に相応しいものはバンドパスフィルター (BPF) だと考えられる。バンドパスフィルターのみ利用する理由はバンドパスフィルターが一定範囲の周波数のみ選択・増幅できるからである。ハイパスフィルターの場合には指定された周波数以上の帯域が全部増幅させられ、遮断装置が指定されない周波数で誤動作させてしまう可能性がある。そのためハイパスフィルターは適用できないと考えられ、100 [kHz]を中心周波数としたバンドパスフィルターを使用する。

一方、フィルターには次数というパラメータがある。次数が高くなると、パーツが多くなりシステムが複雑になるものの、フィルターの特性が良くなる。そして、高い次数のフィルターでは応答特性が選ばれる。常用の応答特性は以下のように示す。

**バターワース特性**：振幅特性と位相特性のバランスが最も良いフィルターである。なお、信号の通過域と阻止域においてリップルを持ってない。ところが、信号の通過域から阻止域への変化領域が比較的緩やかで、そのため振幅特性の

平坦性が良い。

チビシエフ特性：通過域におけるリップル特性を犠牲にすることで、同じ次数のバターワースフィルターに比べると、周波数特性の変化領域は急峻な特性を示す。

ベッセル特性：通過域における位相特性が線形であるため、他のフィルターに比較して非常に良い時間領域におけるトランジェント応答を示す。このため、周波数応答におけるロールオフ特性はそれほど急峻ではなく、阻止域における信号の減衰特性があまり良くない。

以上の説明より、本研究では要求される特性はバランスが良いもののため、バターワース特性が良いと考えられる。

まとめると、フィルターはバターワース特性を用いるバンドパスフィルターである。ここでバターワース特性の設計表を Table.5-2 にまとめる。

Table.5-2 バターワース特性の設計表(一部)

Order n	Section	f <sub>0</sub>	α(1/Q)	Q
2	1	1	1.4142	0.7071
3	1	1	1	1
	2	1		
4	1	1	1.8438	0.5412
	2	1	0.7654	1.3065

#### 5.2.4.2 受動バンドパスフィルターの設計

フィルターの理論では最も簡単なものは電源なしフィルターで、その構成は単純な LC・RC あるいは RLC 回路である。

設計する前に、要求されるフィルターの指標を指定しなければいけない。具体的な指標は以下のようにする：

1. バターワース特性の BPF を使用すること
2. 中心周波数 f<sub>0</sub> : 100 [kHz], 低域遮断周波数 f<sub>LC</sub> : 80 [kHz], 低域阻止周波数 f<sub>LS</sub> : 50 [kHz], 高域遮断周波数 f<sub>HC</sub> : 125 [kHz], 高域阻止周波数 f<sub>HS</sub> : 200 [kHz]
3. 遮断周波数から阻止周波数までの減衰量 : ≥-15 [db]

指標と前述より、LC 型 BPF の構成は LPF と HPF の直列で、それぞれの特性は次数によって上下があるので、次数を算定する。計算式は以下のように示す：

$$\text{次数} : N = \frac{\log(\frac{1}{\delta_s^2} - 1)}{2 \log(\frac{f_s}{f_c})} \dots \dots \dots (5-4)$$

$$\text{減衰係数} : \delta_s = 10^{-\frac{\text{減衰量}}{20}} \dots \dots \dots (5-5)$$

次にバターワース設計表の利用法を論じる。Table.5-2 の設計表はプロトタイプ・ローパス応答特性である。いわゆる、正規化された係数が一覧表になったものである。設計表を利用する場合、流れは次数を確定して設計表から伝達関数を求め、次に伝達関数の分母を展開し、プロトタイプ・ローパス回路を求め、最後に逆正規化すれば要求に相応しい電源なしフィルターが設計できる。計算過程は以下のようにする：

$$\text{減衰係数} : \delta_s = 10^{-\frac{\text{減衰量}}{20}} = 10^{-\frac{|-15|}{20}} = 0.1778 \quad \dots\dots\dots (5-6)$$

次数計算：

$$N_H = \frac{\log(\frac{1}{\delta_s^2}-1)}{2\log(\frac{f_{HS}}{f_{HC}})} = \frac{\log(\frac{1}{0.1778^2}-1)}{2\log(\frac{200 \times 10^3}{125 \times 10^3})} = \frac{1.48604}{0.40824} = 3.64 \approx 4 \quad \dots\dots\dots (5-7)$$

$$N_L = \frac{\log(\frac{1}{\delta_s^2}-1)}{2\log(\frac{f_{LS}}{f_{LC}})} = \frac{\log(\frac{1}{0.1778^2}-1)}{2\log(\frac{50 \times 10^3}{80 \times 10^3})} = \frac{1.48604}{0.40824} = 3.64 \approx 4 \quad \dots\dots\dots (5-8)$$

よって、それぞれ4次のLPFとHPFを直列接続すると4次のBPFになる。プロトタイプ・ローパス応答特性を利用する回路図はFig.5-3(a)とFig.5-3(b)に示される。LPFのLC容量はTable.5-2の4次 $\alpha$ の数値である。そしてHPFの容量は単純にLPFの逆数である。これらは特性抵抗1[ $\Omega$ ]の回路であるが、特性抵抗を100[ $\Omega$ ]にする計算式は以下のようにする。

LPF：

$$L_{LPF1} = \frac{R_s}{2\pi f_{HC}} L'_{LPF1} = \frac{100}{2\pi \times 125 \times 10^3} \times 0.7654 = 9.75 \times 10^{-5} \approx 100[\mu H] \quad \dots\dots\dots (5-9)$$

$$L_{LPF2} = \frac{R_s}{2\pi f_{HC}} L'_{LPF2} = \frac{100}{2\pi \times 125 \times 10^3} \times 1.8478 = 2.35 \times 10^{-4} \approx 200[\mu H] \quad \dots\dots\dots (5-10)$$

$$C_{LPF1} = \frac{1}{2\pi R_s f_{HC}} C'_{LPF1} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 125 \times 10^3} \times 1.8478 = 2.35 \times 10^{-8} \approx 27[nF] \quad \dots\dots (5-11)$$

$$C_{LPF2} = \frac{1}{2\pi R_s f_{HC}} C'_{LPF2} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 125 \times 10^3} \times 0.7654 = 9.75 \times 10^{-9} \approx 10[nF] \quad \dots\dots (5-12)$$

HPF：

$$L_{HPF1} = \frac{R_s}{2\pi f_{LC}} L'_{HPF1} = \frac{100}{2\pi \times 80 \times 10^3} \times 0.5412 = 1.077 \times 10^{-4} \approx 100[\mu H] \quad \dots\dots\dots (5-13)$$

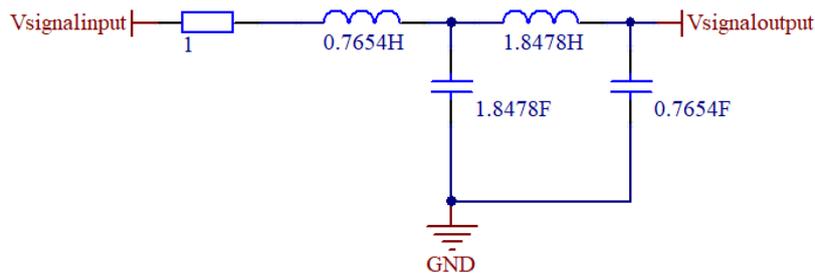
$$L_{HPF2} = \frac{R_s}{2\pi f_{LC}} L'_{HPF2} = \frac{100}{2\pi \times 80 \times 10^3} \times 1.3065 = 2.6 \times 10^{-4} \approx 300[\mu H] \quad \dots\dots\dots (5-14)$$

$$C_{HPF1} = \frac{1}{2\pi R_s f_{LC}} C'_{HPF1} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 80 \times 10^3} \times 1.3065 = 2.6 \times 10^{-8} \approx 27[nF] \quad \dots\dots\dots (5-15)$$

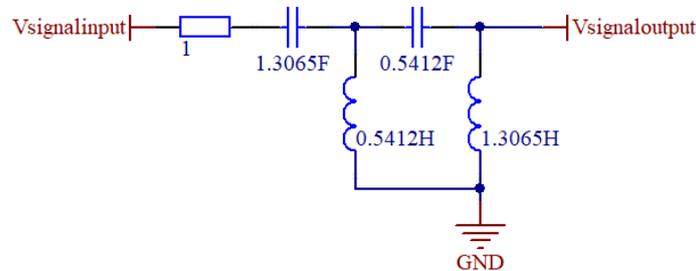
$$C_{HPF2} = \frac{1}{2\pi R_s f_{LC}} C'_{HPF2} = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 80 \times 10^3} \times 0.5412 = 1.077 \times 10^{-8} \approx 10[nF] \quad \dots (5-16)$$

このパラメータを利用したら、Fig.5-3(c)のような回路ができる。要注意するのは回路に負荷抵抗を 200 [Ω]に指定することである。しないとフィルターの遮断特性が変わり、フィルターの性能劣化に至ってしまう。

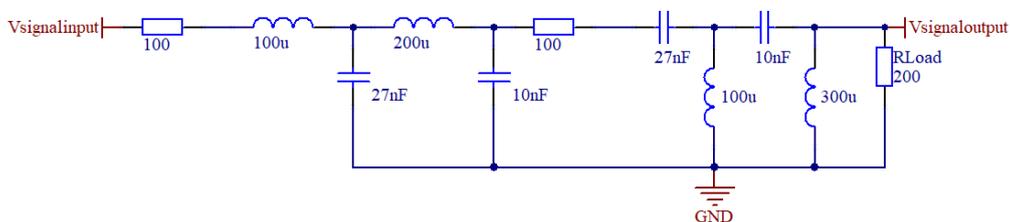
更に式(5-9)～式(5-16)のリアクターの容量を近似した。それは特性劣化の直接な原因である。後節でシミュレーションと実験の特性曲線を見るとすぐに分かる。



(a) 特性抵抗 1 [Ω]を有するローパスフィルター



(b) 特性抵抗 1 [Ω] を有するハイパスフィルター



(c) 特性抵抗 100 [Ω] を有する 4 次直列接続した受動バンドパスフィルター

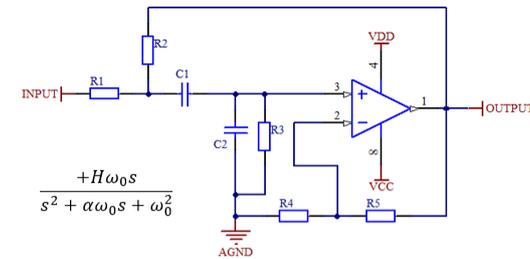
Fig.5-3 4 次受動バンドパスフィルター

受動フィルターは構造簡単であるというメリットがあるものの、デメリットもある。例えば、実際の組み立てにとってパーツの配置やインダクタの製造に考慮しなければいけないこととゲインがないことである。特にその周波数特性は負荷に影響を与えられるので、運用するのは結構困難であると言えざるを得ない。

### 5.2.4.3 能動バンドパスフィルターの設計

前節の受動フィルターのデメリットを克服するために、オペアンプを利用すると、インダクタの代用ができるなどのメリットがある。よく利用される回路はサレン・キー回路と多重帰還型フィルターである。それぞれの特徴は以下のように示す。

a. サレン・キー回路：電圧制御電圧源として知られ、アクティブフィルターとして最も広く使用されている。回路の構成は Fig.5-4 に示されている。



$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Hs \frac{1}{R1C2}}{s^2 + s \left\{ \frac{C1}{R3} + \frac{(C1+C2)}{R1} + \frac{C2}{R2} + \frac{C1}{R2} \right\} + \frac{1}{R3C1C2} \left( \frac{R1+R2}{R1R2} \right)}$$

選択:	$C1$	$R5$
計算:	$k = 2\pi F_0 C1$	$R4 = \frac{R5}{H-1}$
	$C2 = 0.5C1$	
	$R1 = \frac{2}{k}$	
	$R2 = \frac{2}{3k}$	
	$R3 = \frac{4}{k}$	
	$H = \frac{1}{3} \left( 6.5 - \frac{1}{Q} \right)$	

Fig.5-4 サレン・キー型バンドパスフィルター[6-3]

メリット：フィルターの特性がオペアンプの性能に左右されることがほとんどない。抵抗値の最大と最小の比、及びコンデンサ容量値の最大と最小の比が小さい。非反転増幅器であるので、位相の調整が必要ない。

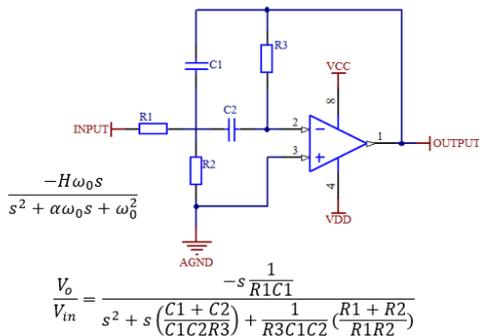
デメリット：バンドパスフィルターになる場合に  $Q$  (クオリティ・ファクタ) の値とフィルターのゲインとの関連性があるため、独立で設定できない。

b. 多重帰還型フィルター：オペアンプを積分回路として使用する。回路の構成は Fig.5-5 に示されている。

メリット：パーツ数が少ないものの、上下差が大きい。 $Q$  が低い場合に推薦する。バンドパスフィルターの  $R2$  を調整すると共振周波数  $f_0$  がチューニングできる。なお、 $Q$  の値も  $R5$  で調節できる。

デメリット： $Q$  を高くすること (20 以上) が困難である。特性がオペアンプ

の性能より変わる。反転増幅器であるので、位相の調整が必要である。



選択:  $C_2$

計算:  $k = 2\pi F_0 C_2$

$C_1 = C_2$

$R_1 = \frac{1}{Hk}$

$R_2 = \frac{1}{(2Q - H)k}$

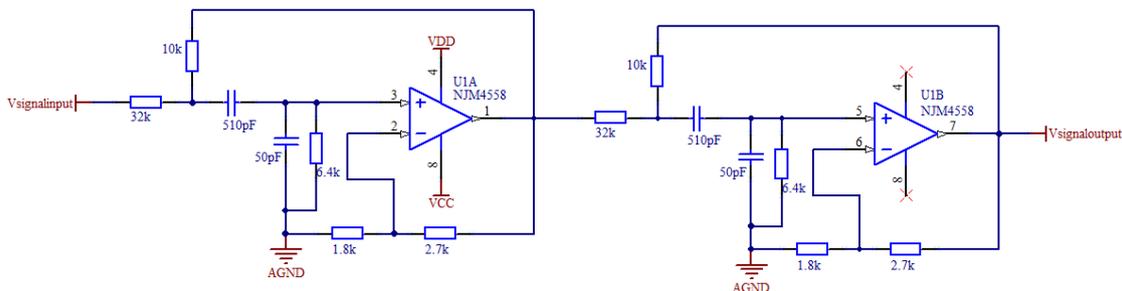
$R_3 = \frac{2Q}{k}$

$H = \frac{1}{3} \left( 6.5 - \frac{1}{Q} \right)$

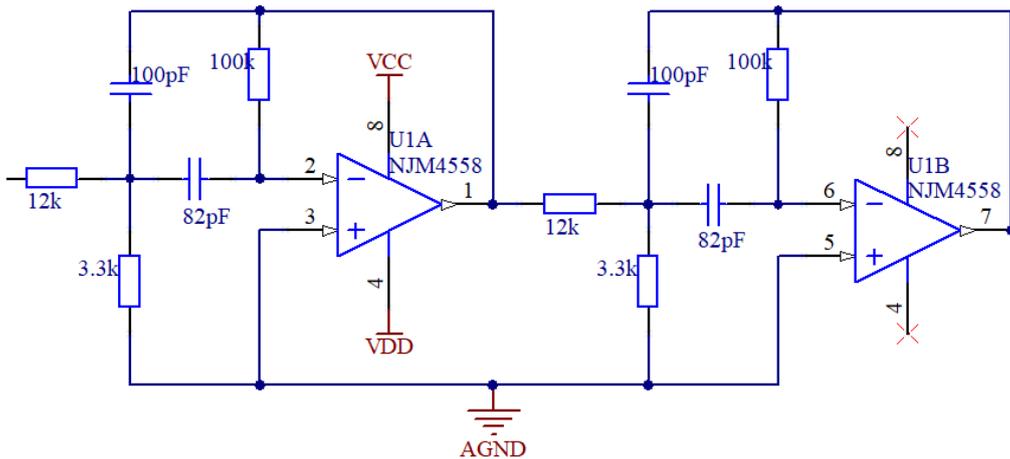
Fig.5-5. 多重帰還型バンドパスフィルタ[6-4]

以上の回路からバンドパスフィルタを構成する。要注意することはゲインと  $Q$  値の指定である。バンドパスフィルタの場合に  $Q$  を高くすると応答特性のピーキングが良くなる。よって、バターワース特性に規定された  $Q$  値を上回ることを勧める。

従って、フィルタ部分の回路の構成を Fig.5-6 に示す。次数は 4 次である。



(a) サレン・キー型バンドパスフィルタ



(b) 多重帰還型バンドパスフィルタ

Fig.5-6 能動バンドパスフィルタ

#### 5.2.4.4 能動バンドパスフィルタの選択

結論として 4 次のバターワース特性を有する能動的な多重帰還型バンドパスフィルタを使用することが望ましい。具体的な特性比較は 5.3 節のシミュレーションに述べる。更に安定度向上と感度調整を可能にするために、フィルタの前後にインピーダンスマッチング用増幅回路も使用している。マッチング回路のゲインを調整すると、指定した周波数への感度が調整できる。

具体的なフィルタ性能指標は以下の通りである：

1. バターワース特性のバンドパスフィルタを使用する
2. 中心周波数  $f_0$  : 100 [kHz], 低域遮断周波数  $f_{LC}$  : 80 [kHz], 低域阻止周波数  $f_{LS}$  : 50 [kHz], 高域遮断周波数  $f_{HC}$  : 125 [kHz], 高域阻止周波数  $f_{HS}$  : 200 [kHz]
3. 遮断周波数から阻止周波数までの減衰量 :  $\geq -15$  [dB]

バンドパスフィルタの回路を Fig.5-7 に示す。V<sub>signal</sub> はピックアップ回路からの制御信号である。その信号がインピーダンスマッチング用増幅回路、多重帰還型バンドパスフィルタ、インピーダンスマッチング用増幅回路を通るが、この間に指定される周波数の信号のみが選択・増幅される。

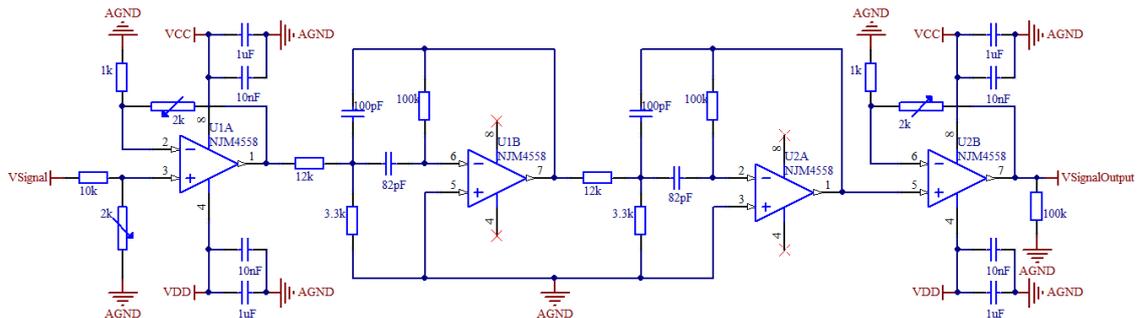


Fig.5-7 選定された能動バンドパスフィルタ (多重帰還型)

### 5.2.5 遮断装置の直列運転と制御信号転送回路

Fig.5-1 のように太陽電池モジュールごとに遮断装置が設置される。制御信号を均等にすべての遮断装置に送信しないと遮断装置が正常に動かない。また、太陽電池アレイは直列・並列が複合的に組合されて構成されているので、並列運転と直列運転についての検討をしなければいけない。並列の場合、制御信号発生源の出力電力を増やせばよいが、困難なのは直列運転である。その解決策を本節で検討する。

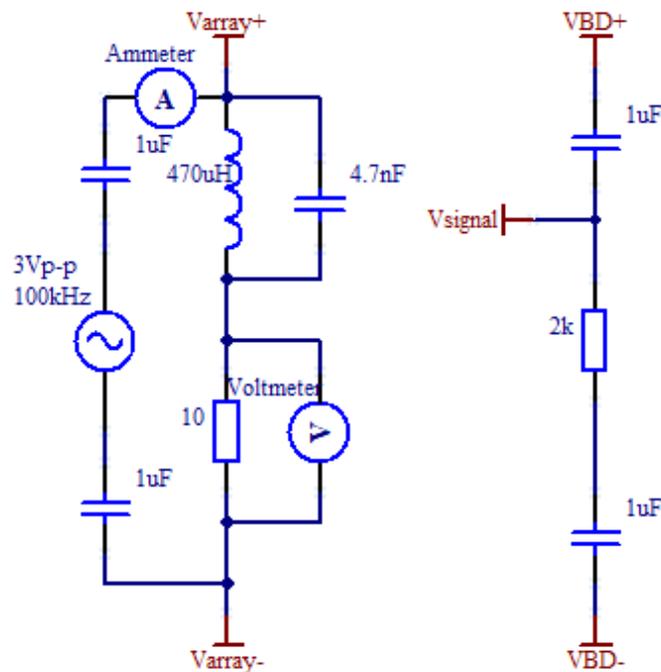


Fig.5-8 負荷と制御信号発生源 Fig.5-9 ピックアップ回路

Fig.5-8 に示すのは制御信号源と想定する太陽電池アレイ回路の負荷抵抗である。仕組みとして、信号源は制御信号を発生し、この電圧がコンデンサを通じて直流配線に載せる。同時にコンデンサは信号源の出力端子を保護するために直流分を遮断する。すると、信号源から見る出力インピーダンスは負荷抵抗と太陽電池モジュール等の並列インピーダンスである。負荷に交流信号が流れないように、並列共振回路を負荷の両側に追加する。この太陽電池アレイ回路の中で交流信号がある部分は送電線(Varray+)だけとなる。

Fig.5-9 に示す受信側というと、交流の制御信号が 2 [kΩ] の抵抗でピックアップされる。ただし、アレイ回路には直列接続しているストリングにより、複数の遮断装置を直列運転しなければいけない。その場合には信号がその抵抗を通じて次の装置へ転送されることを実現するのが最も重要であるが、抵抗のみで信号転送を実現するのは極めて困難である。よって、制御信号を転送する回

路が必要であり、転送回路の仕組みは以下のように説明される。

ピックアップ回路で制御信号が受信されると、Fig.5-7の回路でフィルター・増幅してから、2つに分ける。一方は倍圧整流回路に入り、スイッチを動作する電圧を発生する。他方は遮断装置に送信する。その転送回路の構成を Fig.5-10に示す。

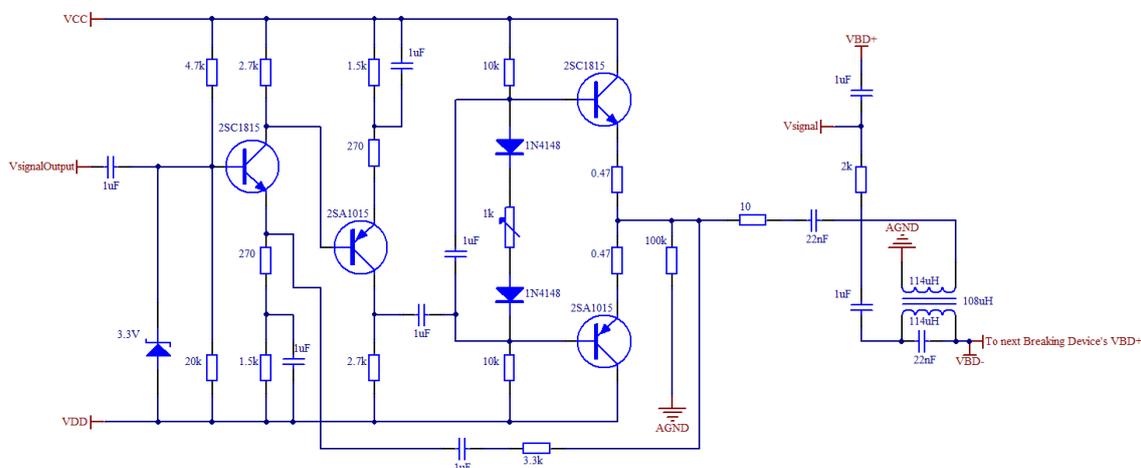


Fig.5-10 制御信号の転送回路

増幅器は簡単なトランジスタ回路で構成され、共振トランスを用いて制御信号を次の遮断装置に結合する。ただし、トランスは誘導性要素なので、利用時に送信回路の出力電流が要求されるため、プッシュプル式電流増幅器を用いる。更に、トランスの誘導性を緩和しつつ、出力信号の波形を保つために、一次側にRLC直列共振回路・二次側にLC並列共振回路を利用する。コンデンサの耐圧値よりQ値を決め、限流抵抗Rを10[Ω]と指定した。二次側にとって交流信号のインピーダンスが無限大のため、抵抗は必要なくLCのみがあれば十分と考える。トランスの選択によって、二次側に直流電流が大量に流れるので、磁気飽和に耐えられるメタルパウダーコアを有するコモンチョークコイルを使用する。一方、回路を安定化することやゲインを調整するために、負帰還回路を追加する。なお、転送回路の電源とフィルターの電源とは兼用できる。

### 5.2.6 遮断装置の電源供給

本研究で開発した遮断装置はシリコン系太陽電池モジュールに適用すると想定する。調査の結果より、市販のシリコン系太陽電池モジュールは開放電圧の範囲が10[V]~60[V]であるものが多いことがわかった[6-5]。異なる放射照度とモジュール表面温度で太陽電池モジュールの出力特性が変わる。更に発電システムのMPPT機能でモジュールの特性が常に調整されている。従って、発電している太陽電池モジュールの出力電圧も常に変化している。

以上に述べた各機能に安定的な電源供給が必要である。なお、安定的な電源は遮断装置の自己消費電力の軽減も可能とする。

### 5.2.6.1 開発初期の電源回路

最初に開発した遮断装置には、特に電源回路を設けなかった。モジュールの出力電圧は Fig.5-11 のように、Q2 と Q3 で直接に降圧して、リレーに供給した。Q4 はリレー用定電流源である。Q4 にも降圧効果がある。

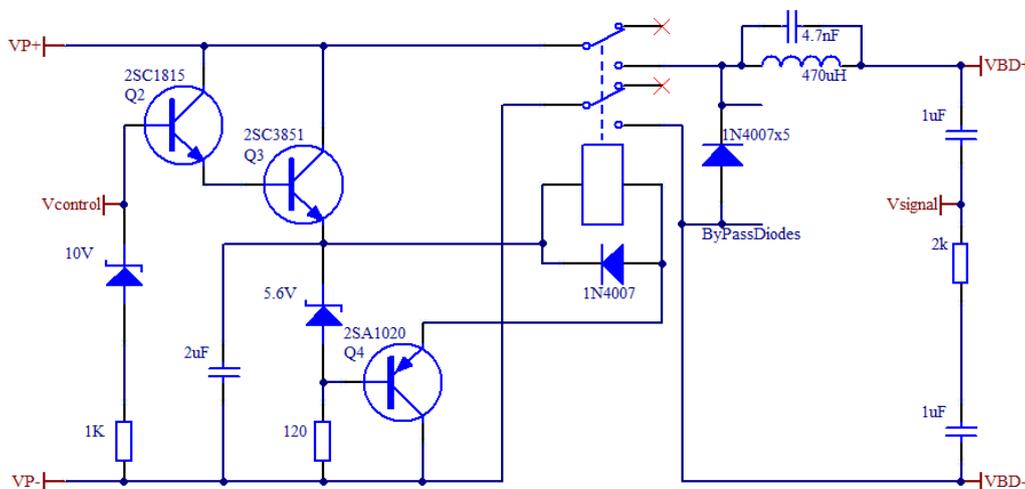


Fig.5-11 リレー用降圧回路

実機検証したところ、この場合にエネルギーの損失が多いことがわかった。5.2.2 節の分析より、主要な損失は Q3 に発生するとわかった。パーツを選定する際、Q3 には To-220 パッケージを用い、放熱板が必要である。

### 5.2.6.2 リニア仮想接地電源

研究の進展により遮断装置にフィルターを追加とともに、フィルターのオペアンプの正常な動作には仮想接地電源が必要とわかった。よって、仮想接地電源が使用できる電源回路を初めて設計に入れることとした。

通常の仮想接地電源は Fig.5-12 に示すとおりである。

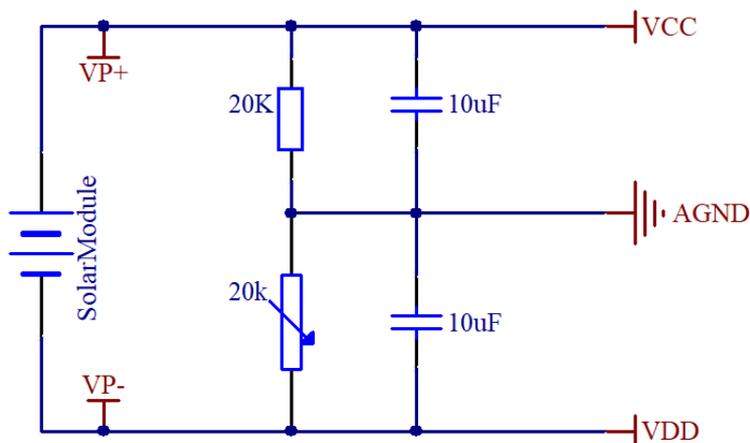


Fig.5-12 仮想接地電源回路

直列接続している抵抗とコンデンサにより、電源電圧を分圧する。通常の接地は VDD であるが、仮想接地があれば、VDD はマイナス電圧になる。そうして、可変抵抗の追加により、接地点の電圧が調整できるようになる。コンデンサは交流信号を流れるようにするために使用する。

しかし、その回路を遮断装置に入れると、デメリットがある。それは電源電圧の変化範囲が広いこと及びその電圧がフィルターに用いるオペアンプに対して高すぎることである。特に太陽電池モジュールの開放電圧が 50 [V]以上になる場合に、電圧の制限が必要になる。これらを考慮する事により次の回路を得た。

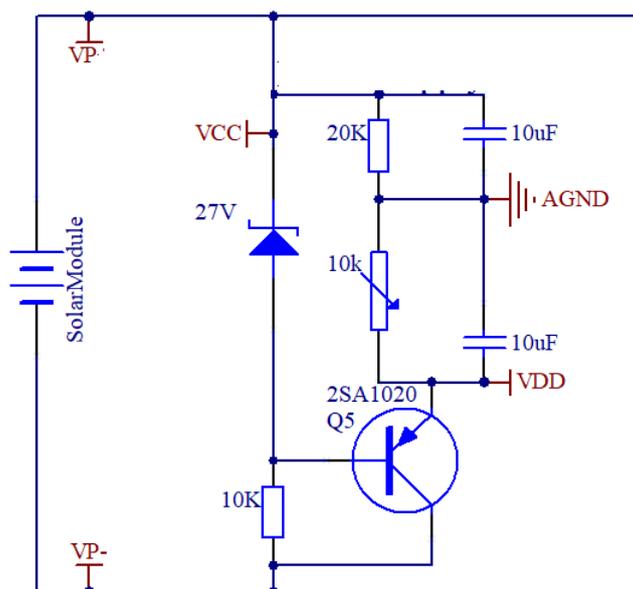


Fig.5-13 電圧を制限する仮想接地電源回路

Fig.5-13 は改良版の仮想接地電源回路である。電圧制限は 27 [V]のツェナーダイオードで行われる。同時に流れる電流を下部の定電流源で制限する。しかし、27 [V]を仮想接地しても±18.5 [V]であるので、オペアンプにとって依然高すぎる。

### 5.2.6.3 PWM 仮想接地電源

電源回路は直接に±5 [V]が出力できればいいと考え、Fig.5-13 のようなリニア回路ではなく、PWM 電源 IC を用いた。Fig.5-14 に示す。

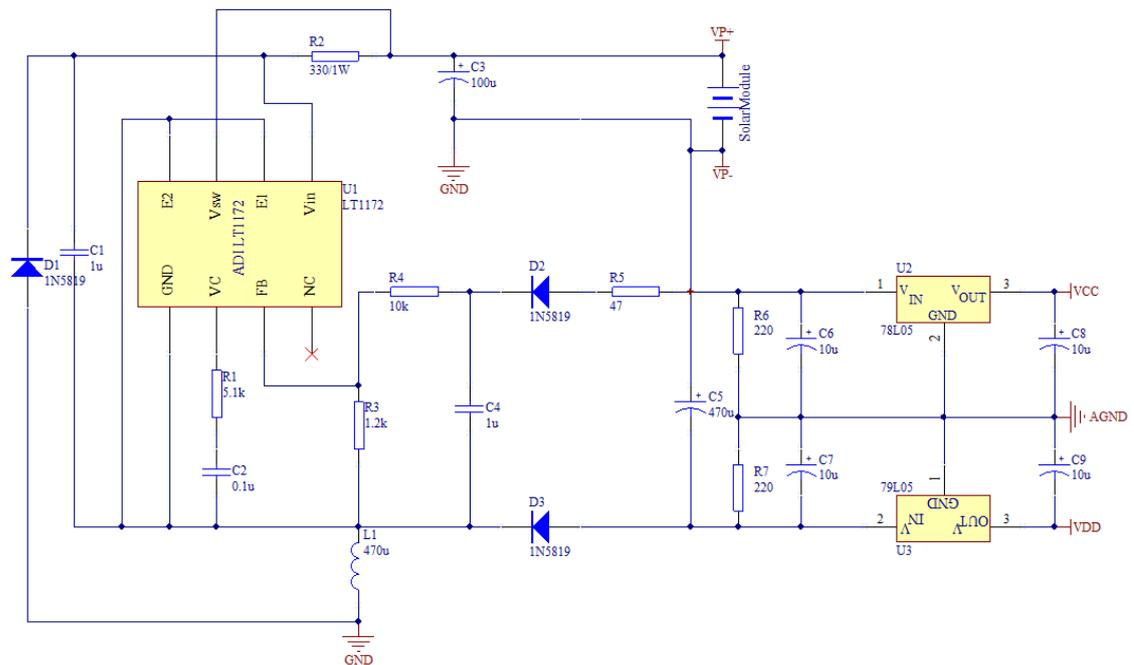


Fig.5-14 PWM 昇降圧回路を用いる仮想接地電源

この回路には 3 つの IC を用いる。ADI 社の LT1172 は PWM 昇降圧チップである。機能として設定された電圧を目標として、電源電圧が目標電圧より低い場合に昇圧動作をし、電源電圧が目標より高い場合に降圧動作する。入力電圧範囲は 5 [V]~60 [V]以上であるので、太陽電池モジュールにとって実に相応しいと考える。出力を 12 [V]と設定した。U2 の 7805 と U3 の 7905 はリニアレギュレーターである。これにより 5 [V]と-5 [V]を出力する。

この回路の採用により、Fig.5-11 のようなトランジスタを用いる降圧回路が使えなくなった。特に電力損失が激しいリニア技術より、PWM の方の電力損失が低減できるメリットがあり、遮断装置全体の自己消費電力削減を達成した。

## 5.3 シミュレーションでの検証

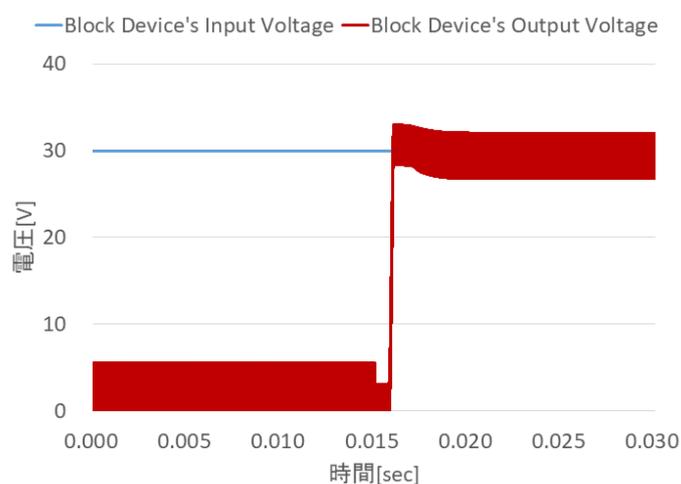
設計した遮断装置を Orcad 社の PSpice で数値シミュレーションを行い、結果を検討する。

### 5.3.1 遮断装置の投入動作

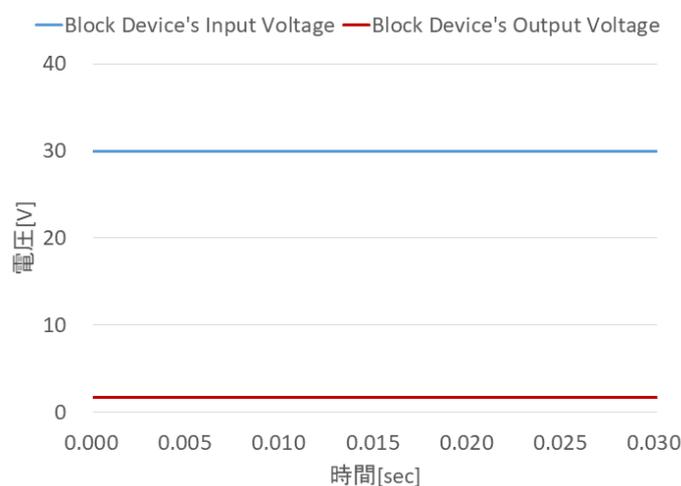
シミュレーションの設定：

- シミュレーションの時間長は 200 [msec]
- ステップタイムは PSpice によって自動調整される
- 制御信号は 100 [kHz]・-3~0 [V]の方形波
- 電源電圧は 30 [V]

シミュレーションの結果を Fig.5-15 に示す：



(a) 制御信号あり



(b) 制御信号なし

Fig.5-15 シミュレーションの結果

Fig.5-15 より、赤の線が遮断装置の出力側（制御信号源と接続している）、緑の線が太陽電池モジュールを模擬する電源側である。制御信号がある場合にリレーの両側の電圧がリレーの動作遅延を経て同電圧になった。制御信号がない場合に遮断装置が動作しなかった。

よって、シミュレーションで提案装置は直流電圧を遮断することが検証できた。ただし、PSpice の性能制限より、遮断装置の開放動作が検証できないため、実機において実行したい実験に検討する。

### 5.3.2 バンドパスフィルタについてのシミュレーション

設計した 3 種類の BPF と遮断装置を組み立て、応答特性を解析する数値シミュレーションを行う。

数値シミュレーションでフィルタ回路及びその入出力増幅回路の周波数応答特性を検証する。結果が Fig.5-16 に示されている。3 つの波形とも BPF 特有な富士山型応答特性が有する。ピーキングが鋭いのがサレン・キー型フィルタであるものの、特性のバランスが優れているのは青い線の多重帰還型フィルタである。開発された装置にとってピーキングが鋭いことは良いわけではなく、逆に特性曲線のバランスや滑らかさが大事である。特性曲線より、指定外周波数についてオレンジ色の線が青い線の上であり、範囲外の周波数成分も増幅されてしまい、逆に制御信号についての応答特性が悪くなった。

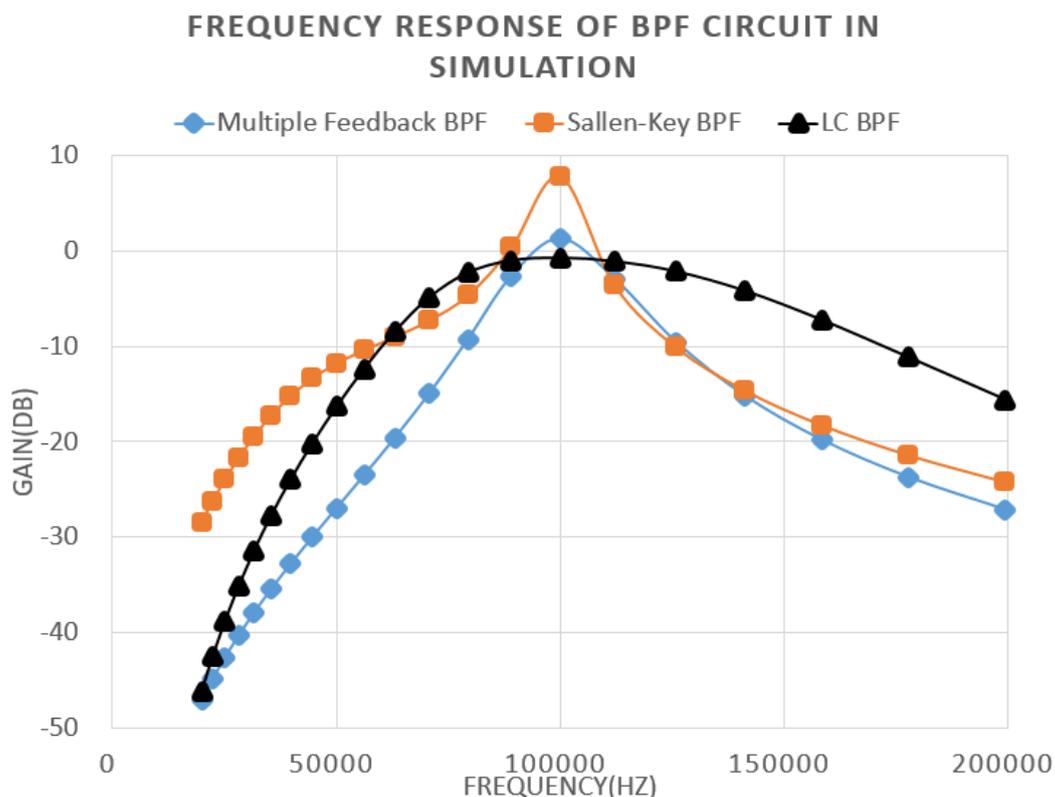


Fig.5-16 周波数応答特性

### 5.3.3 動作可能な制御信号電圧の下限

本節では一定周波数の制御信号に対する提案回路の感度を検討する。本研究では遮断装置にバンドパスフィルターを利用するので、指定する周波数で遮断装置が動作可能な制御信号電圧の下限をなるべく低くしながら、指定外周波数の電圧の下限をできるだけ高くしたほうが良い。

シミュレーションの設定は以下のようにする：

- 電源電圧は 10 [V]
- 指定された特定制御信号周波数は 100 [kHz]正弦波
- 制御信号の周波数は 60~160 [kHz]の正弦波を 10 [kHz]ごとに変化し、3種類のバンドパスフィルターの遮断装置動作可能な制御信号電圧下限を測定して示す。
- 0.5 [Vp-p]の電圧で遮断装置が動作可能となるようバンドパスフィルターのゲインを設定した。

ゲイン設定の理由は太陽光発電システムの設置場所は室外であり、動作可能な制御信号電圧が低すぎると、雷での電磁パルス (EMP) や無線電波が太陽電池アレイ回路の配線に侵入し、遮断装置を誤動作させる可能性がある。逆にその電圧を高く設定すると、制御のために制御信号源から出す電圧も高くなり、直流回路に悪影響を与える。

Fig.5-17 に示すシミュレーション結果より、動作可能制御信号電圧を 0.5 [Vp-p]に設定し、制御信号が 100 [kHz]より遠くにすると、制御信号電圧の下限が上昇し、ピーキングができたと共に指定外周波数での制御可能電圧が大幅に上昇した。多重帰還回路のピーキング (青い線) が一番良いと考える。

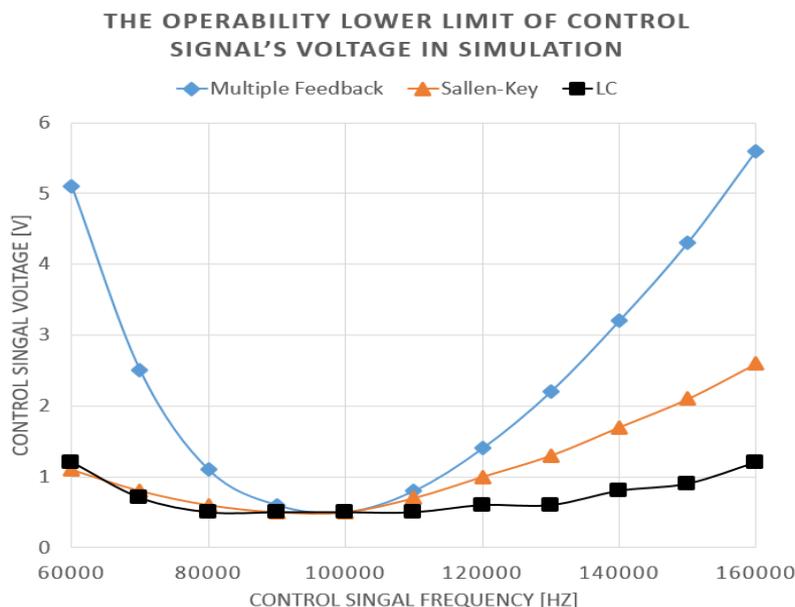


Fig.5-17 シミュレーション上の動作可能な制御信号電圧の下限

### 5.3.4 遮断装置の直列運転

PSpice で遮断装置の直列運転をシミュレーションする。Fig.5-18 に示す波形は直列接続する遮断装置 4 個の動作である。分かりやすく示すために 0~15 [msec]の波形を省略した。シミュレーションソフトの機能制限より、最初から 100 [kHz]・2 [Vp-p]の正弦波を制御信号として出す。電源電圧を 20 [V]と設定する。

波形より遮断装置の動作遅延は制御信号出力後 20 [msec]前後であった。そして、リレーの動作前に電圧が負になったり、他に振動が発生すると見られる時間帯があったりする。それはリレー投入の瞬間に機械的な振動やその投入動作で制御回路の回路状態が変わることで発生する。これが安定するまでには時間が必要であり、アナログ回路だからこそのことである。

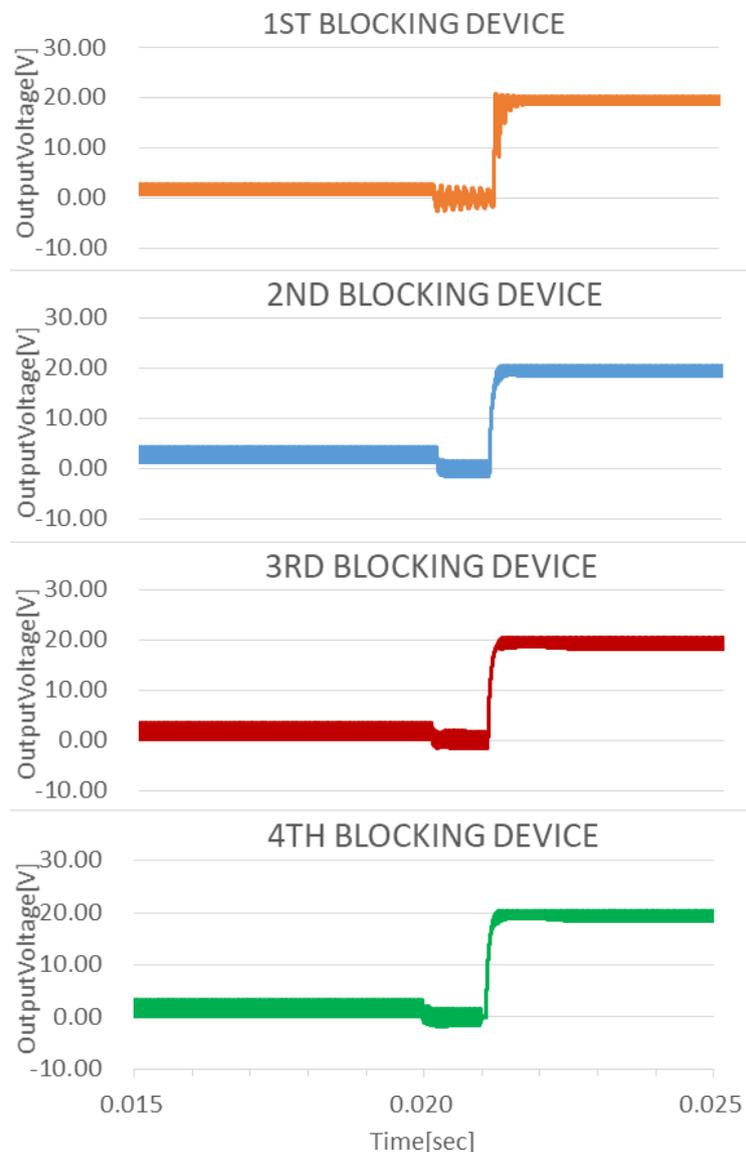


Fig.5-18 遮断装置の直列運転

## 5.4 実機検証の結果

提案した遮断装置は印刷基板を用いて 4 個，ユニバーサル基板を用いて 2 個試作した。そのうちの印刷基板 2 個とユニバーサル基板 2 個に転送回路を追加した。試作品の仕様を Table.5-3 にまとめた。

実機実験する前にシミュレーションを行ったので，そのデータを含めて総合的に検討する。

Table.5-3 提案した遮断装置の仕様

Rated voltage range	7.5 [V]~50 [V]
Rated power range	20 [W]~400 [W] (silicon module)
Control signal	3 [Vp-p], 100 [kHz], sine wave
Theoretical maximum efficiency	~97.9%

### 5.4.1 フィルターに対する周波数応答特性の実験検証

周波数応答特性の検討はシミュレーションと実測との間に行い，比較結果は Fig.5-19 に示されている通りである。

測定はフィルター回路と対象として行う。実験条件を以下のようにする：

- 電源電圧：11 [V]；
- バンドパスフィルターのゲイン設定：0.5 [Vp-p]，100 [kHz]の正弦波で制御可能として設定した；

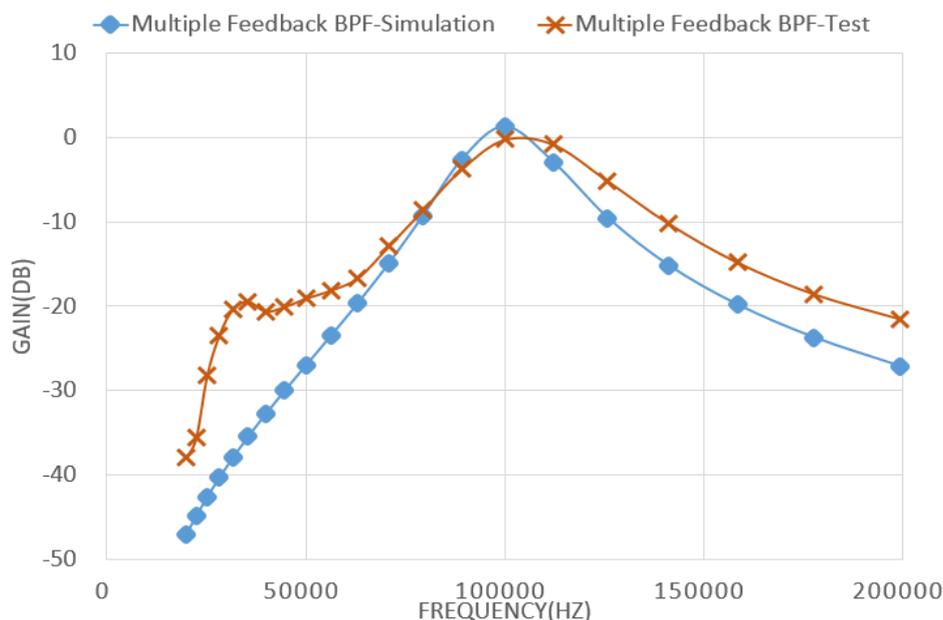
結果として，Fig. 6-19(a)の多重帰還型フィルターと Fig. 6-19(c)の受動 LC フィルターが設計通りに動いたものの，Fig. 6-19(b)のサレン・キー型フィルターの動作はシミュレーションの結果と合わなかった。その原因は 5.2.4.3 節に説明したサレン・キー型フィルターの Q 値とゲインの関連性によるものと思われる。このためサレン・キー型は不採用とした。なお，3つのフィルターの応答特性では 40 [kHz]の所にゲインの奇妙な波動があった。その原因は試作回路を作成したユニバーサル基板の浮遊インダクタンスと浮遊キャパシタンスが印刷基板より大きいことであると思われる。その影響でフィルターの特性が劣化した。従って，改めて印刷基板で 4 セットを自作し，周波数応答特性を測定した結果を Fig. 6-19(d)の緑線にまとめた（4 セット全部測定したなので，ゲインのデータを平均化して緑線を描いた。緑線が全体的に下に移動したと見られるが，回路に増幅器があるので，その増幅率を調整すれば上に移動することができる。すると，

$$Q = \frac{G_{\omega_0}}{G_{\omega_2} - G_{\omega_1}} \quad (\omega_1 \cdot \omega_2 \text{は} \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} \text{の大きさ})$$

ユニバーサル基板での試作機の Q=1，印刷基板での試作機の Q=2 で，明らかに印刷基板の特性とシミュレーションの結果と合った。

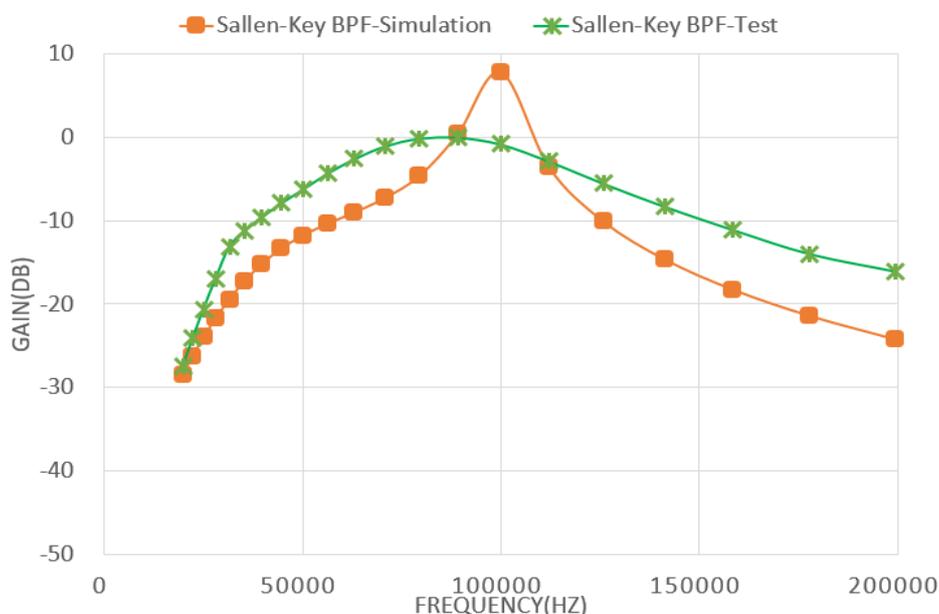
なお、データの平均標準偏差は 1.18 である)。青い線のシミュレーションとオレンジ色のユニバーサル基板で自作した回路と緑線の印刷基板の結果を比較すると、ゲインの波動がなくなると共にピーキングがより一層良くなった。以上を総合すると、指定周波数の 100 [kHz] に適切なゲインを設定し、印刷基板で製造する多重帰還型バンドパスフィルターの性能が一番良い。

### MULTIPLE FEEDBACK BPF'S FREQUENCY RESPONSE COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST



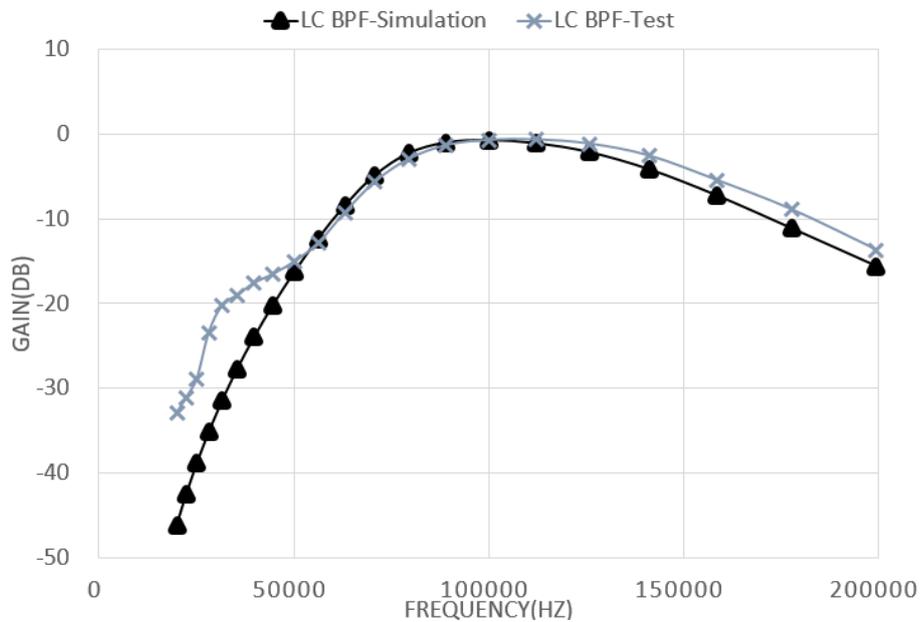
(a) 多重帰還型バンドパスフィルター

### SALLEN-KEY BPF'S FREQUENCY RESPONSE COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST



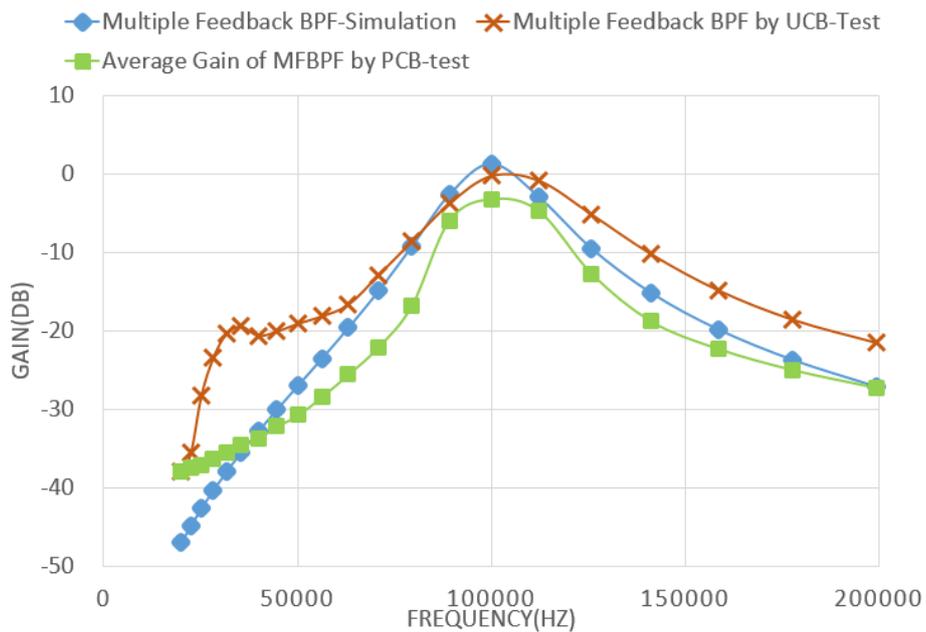
(b) サレン・キー型バンドパスフィルター

LC BPF'S FREQUENCY RESPONSE COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST



(c) 受動 LC バンドパスフィルター

MULTIPLE FEEDBACK BPF'S FREQUENCY RESPONSE COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST



(d) シミュレーション・ユニバーサル基板

及び印刷基板で作ったフィルターの性能比較

Fig.5-19 シミュレーションと実機実験との特性比較

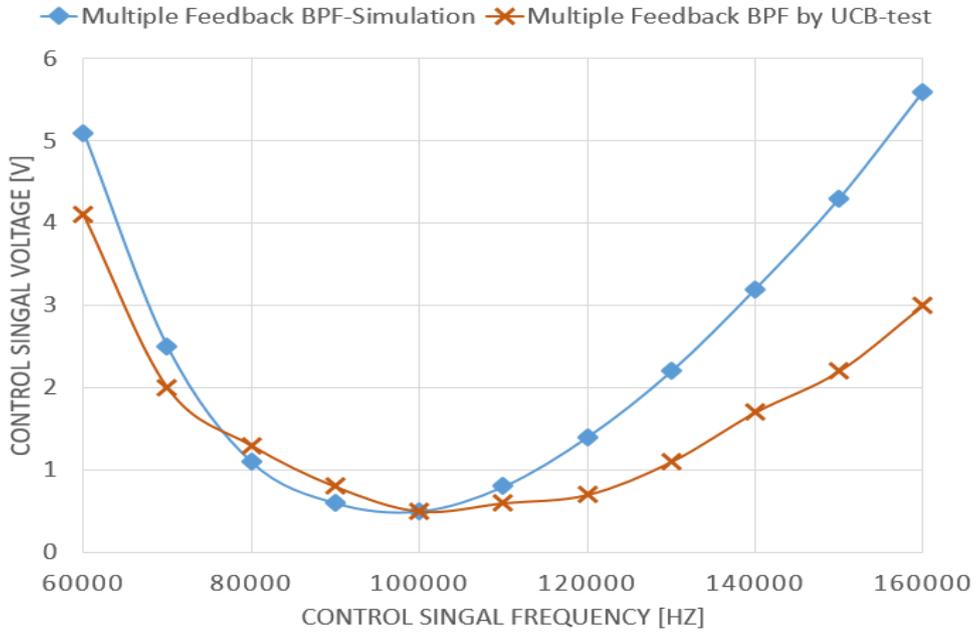
#### 5.4.2 動作可能な制御信号電圧の下限

この指標とは指定周波数にフィルターのゲインを設定した場合に、任意の制御信号電圧に対する可制御周波数範囲はその制御信号電圧（上界線）と本節の動作可能な制御信号電圧下限（下界線）に囲まれた面積であり、逆に制御信号電圧が下限の下にある場合、遮断装置が動作できない。比較検討の結果が Fig.5-20 に示されている。

結果として、Fig.5-20(a)の多重帰還型フィルターと Fig.5-20(b)サレン・キー型フィルターの実測制御動作可能な電圧下限がシミュレーションの結果より劣化したものの、指定周波数へのピーキングが残っている。Fig.5-20(c)の LC フィルターの実測電圧下限とシミュレーションの結果と合っていたが、その特性がブロードすぎてピーキングを失ったので、実用性がなかったと考える。次に数値的に分析すると、多重帰還型フィルターの電圧下限がサレン・キー型フィルターより大幅に向上したため、前述の可制御範囲は多重帰還型フィルターのほうが小さい。例として、1 [Vp-p] 正弦波の信号電圧を出す場合、多重帰還型フィルターの可制御の周波数範囲が約 80 [kHz]～113 [kHz]で、サレン・キー型フィルターの約 60 [kHz]～120 [kHz]で、LC フィルターの約 65 [kHz]～155 [kHz]である。結果として多重帰還型バンドパスフィルターの性能が良く、特に印刷基板で製造したものの特性がより一層良くなった。今後遮断装置に多重帰還型バンドパスフィルターの使用を決めた。

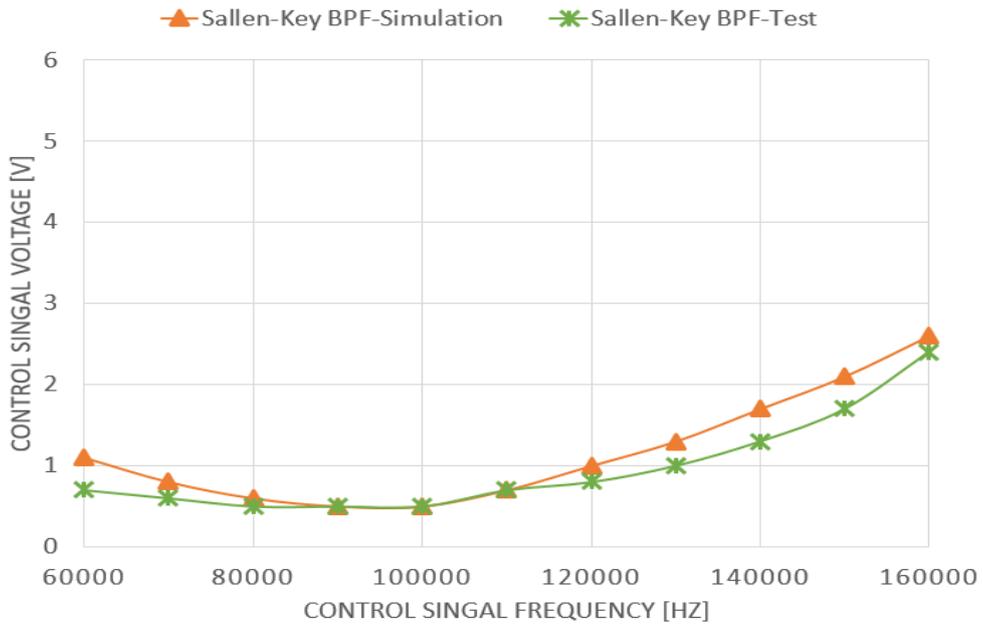
遮断装置全体的な比較結果を Fig.5-21 に示す。シミュレーションの結果は青い折線に、実験の測定点は黄緑の線に示した。実測値は転送回路がある遮断装置 2 個の測定値を平均したものである。設備上の限界（使用するファンクションジェネレーターの出力ピーク電圧が 20 [V]まで）と実験の安全性の観点より、実験の周波数範囲は 70 [kHz]から 150 [kHz]までとした。それ以外の周波数範囲を濃緑色の点線で近似外挿した。近似曲線とシミュレーションの結果を比較すると、両者の傾向が一致した。若干差異が見られる理由は接触抵抗や浮遊容量・配線インダクタンス等の寄生要素によるものと考えられる。さらにパワーコンディショナーの動作キャリア周波数の高調波が遮断装置を誤動作させないかどうかの観点から見ると、キャリア周波数付近の第 2・第 3 高調波のピーク電圧が 20V 以上になる可能性は低いので、それらが遮断装置を誤動作させる可能性も低いと考える。

**MULTIPLE FEEDBACK BPF'S OPERABILITY CONTROL SIGNAL'S VOLTAGE LOWER LIMIT COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST**



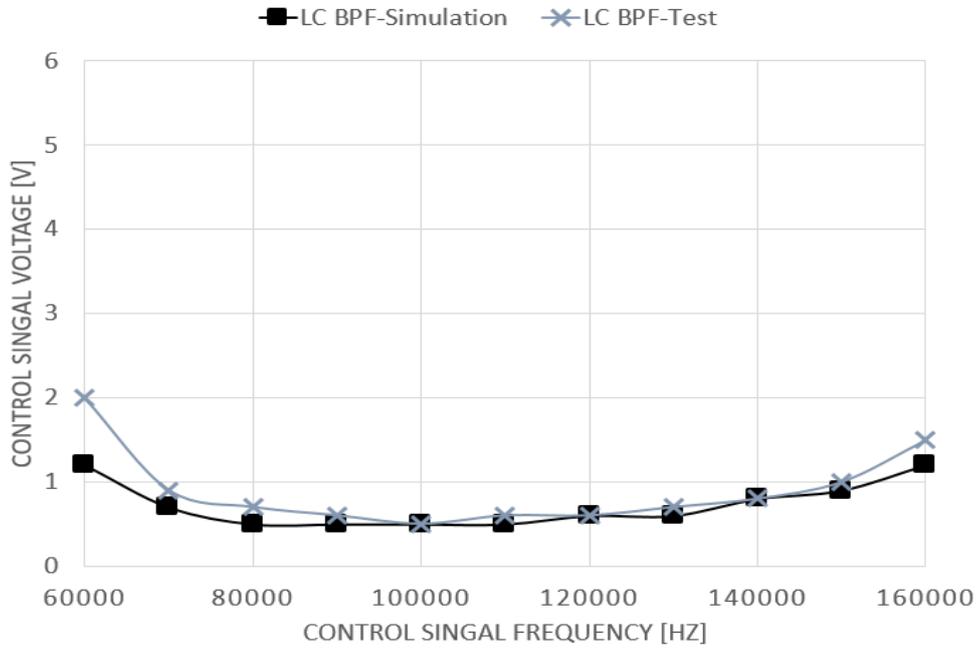
(a) 多重帰還型バンドパスフィルター

**SALLEN-KEY BPF'S OPERABILITY CONTROL SIGNAL'S VOLTAGE LOWER LIMIT COMPARISON WITH SIMULATION AND TEST**



(b) サレン・キー型バンドパスフィルター

LC BPF'S OPERABILITY CONTROL SIGNAL'S  
VOLTAGE LOWER LIMIT COMPARISON WITH  
SIMULATION AND TEST



(e)受動 LC 型バンドパスフィルター

Fig.5-20 三種類バンドパスフィルターが有する遮断装置の比較

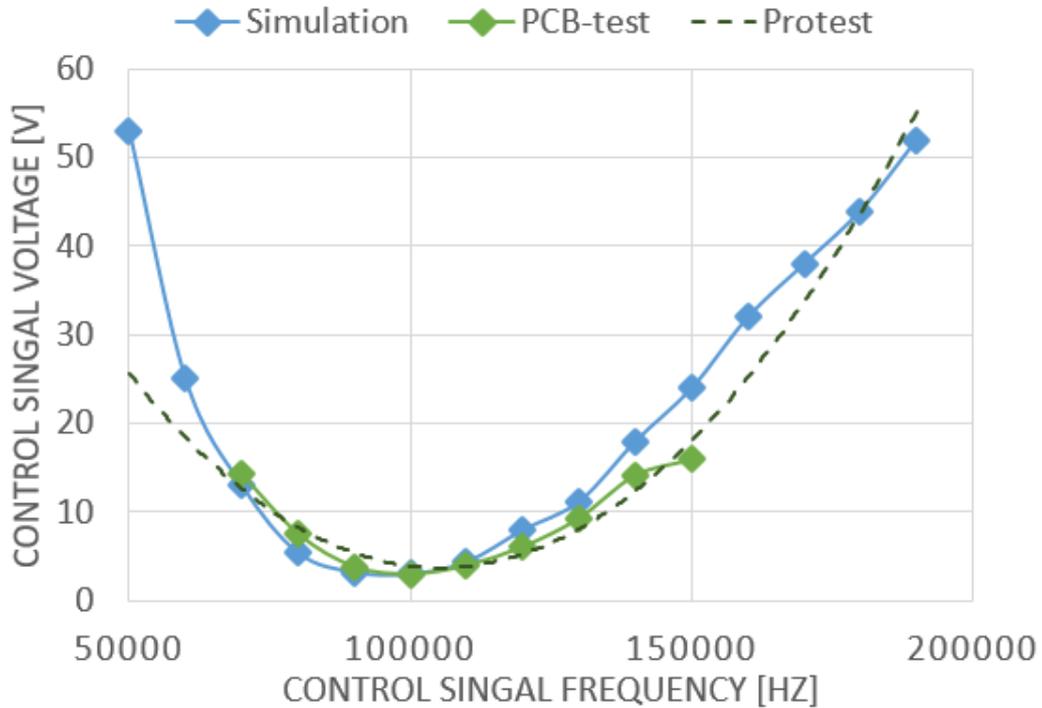
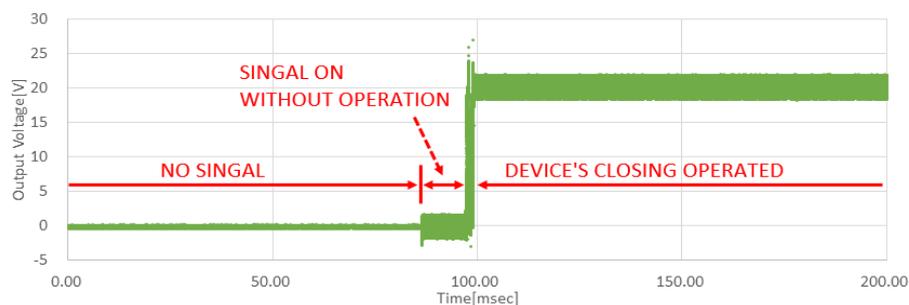


Fig.5-21 シミュレーションと印刷基板製遮断装置の比較

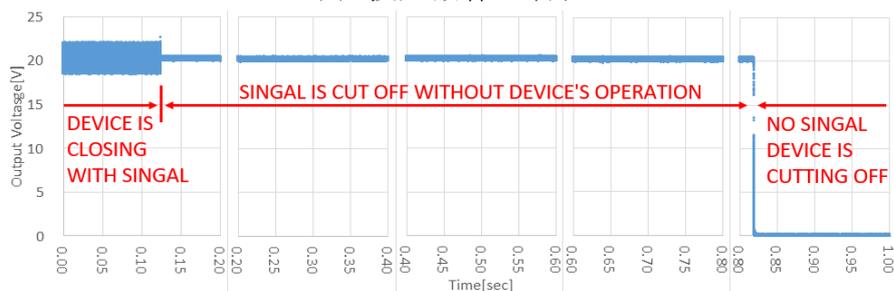
### 5.4.3 遮断装置の開閉速度

遮断装置の主要目的は直流電圧の遮断である。緊急時に電流を遮断することもできるが、(試作遮断装置に使用するリレーの定格遮断電流は5 [A]であるが、太陽電池モジュールの出力電流に適するリレーに交換することも可能) 本装置はパワーコンディショナーが停止して無負荷となった条件で動作するため、電流の遮断機能は不要であると考えられる。なお、回路の設計上、遮断装置には複数のアナログ機能回路があり、制御信号の有無から開閉動作完了まで各機能回路が順次に動作し、安定-過渡-安定という過渡現象が発生する。よって、装置の開閉速度を検討する必要がある。

実験の条件として、電源電圧を20 [V]、制御信号を3 [Vp-p]・100 [kHz]の正弦波と設定する。その結果をFig.5-22に示す。Fig.5-22(a)には制御信号が発生してから遮断装置が投入動作するまでの過渡現象を、またFig.5-22(b)には制御信号が停止してから遮断装置が開放するまでの過渡現象を示し、動作の遅れを確認した。投入する際の遅れは約15 [msec]である。その原因は制御装置や信号源に交流信号を遮断する部品があるので、スイッチが動作してから充電や共振回路の影響で多少発振が生じるためである。ただし、数ミリ秒後には安定した。開放する際には約700 [msec]の動作遅延があるが、その原因は遮断装置各機能回路の動作遅延と出力電圧が0 [V]になるまでの過渡時間である。設計上に回路の安定度を向上するために各機能回路に複数のコンデンサを入れたので、その中に貯まったエネルギーを消費し尽くすまでに時間がかかるものと考えられる。



(a) 投入動作の特性



(b) 開放動作特性

Fig.5-22 遮断装置の開閉速度

#### 5.4.4 遮断装置の電源電圧に対する適応性

太陽電池モジュールでは多数のセルを直列接続している。前述で 1 個のセルの出力電圧は約 0.5~0.8 [V]であり、多数直列してモジュールなりの出力電圧ができる。しかし、モジュール電圧が定格より大きく外れる場合があると言われる。それは弱い太陽光（放射照度が低い）の場合及び部分陰が発生時に MPPT アルゴリズムの動作でアレイ回路電圧を調整する場合によくあることである。よって、提案した遮断装置にとって、動作必要な最低電源電圧を検討しなければならない。その結果を Fig.5-23 にまとめる。実験の条件として 100 [kHz]・3 [Vp-p]の正弦波制御信号を入れ・切れを繰り返す、当電源電圧で遮断装置が正確に投入・開放動作を操作する。太陽電池モジュールの代わりに直流電圧源を用い、変動している電圧を模擬する。図の縦軸は正確に投入・開放動作ができる(1)かできない(0)かの別を表しておる。電源電圧が 0 [V]から上昇させて上手く投入・動作ができるからの場合を青い線で、電源電圧を 6 [V]から減少させて遮断装置の動作が正確に動作できないまでの場合をオレンジ色の線で示している。

実験の結果より、電源電圧の上昇・降下によりヒステリシス現象が確認された。これは電源電圧が 2.2[V]~5.2 [V]の間に生じる。それは PWM 電源回路が上手く 12V の電圧を昇圧できるかどうか次第である。太陽電池モジュールの電圧が 0 [V]から上昇する場合に、PWM 電源回路の昇圧励起を行うため、少々高い電圧が必要である。逆にモジュール電圧が降下する場合に、PWM 電源回路にすでにエネルギーを貯めているので、2.2 [V]まで遮断装置の動作が安定化されている。

結論として、電源電圧が 5.2 [V]以上になると、遮断装置が正常に開閉動作できる。太陽電池モジュールのデータベース[6-5]で調べると、市販するシリコン製太陽電池モジュールの定格出力電圧の範囲は 15 [V]~60 [V]のものが多い [6-5]。7 [W]~200 [W]レベルの太陽電池モジュールを実測したところ、少量の光（放射照度が約 100 [W/m<sup>2</sup>])があればモジュールの出力電圧が 5.2 [V]を超えることがわかっている。従って、太陽電池モジュールに遮断装置をつけて、装置をうまく動作させることが可能である。

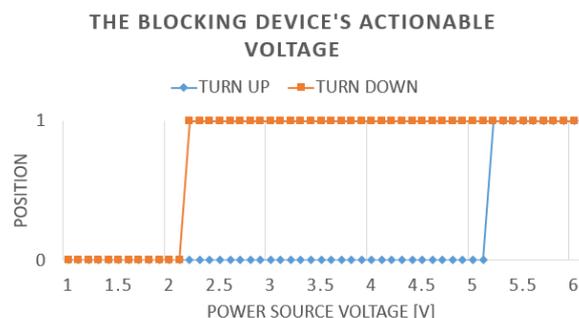


Fig.5-23 電源電圧によるヒステリシス特性

#### 5.4.5 遮断装置の直列運転

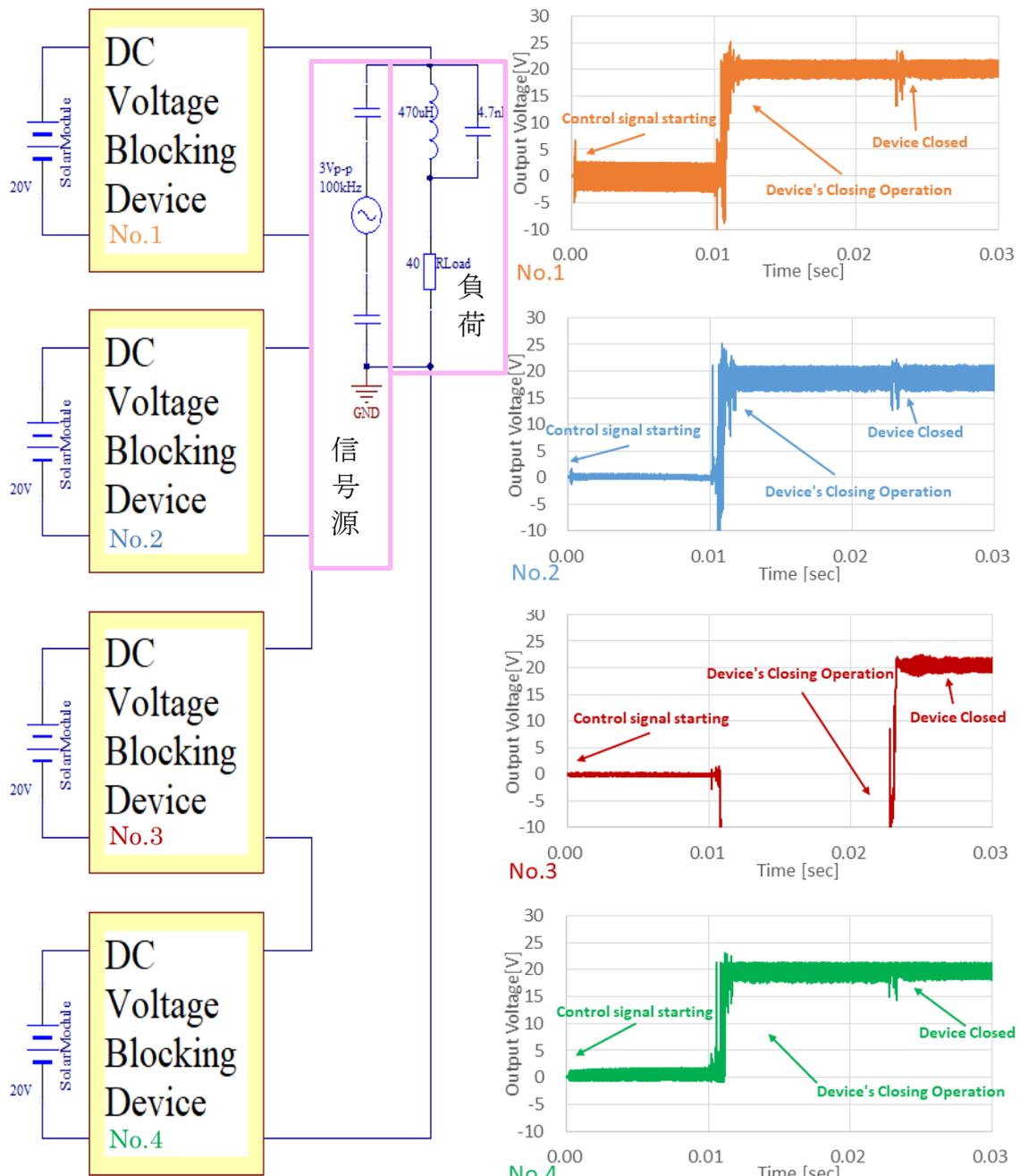
実験は4個の遮断装置を直列接続して行う。回路図は Fig.5-24(a)に示されている。負荷抵抗と接続して、負荷抵抗の両側に制御信号源を並列接続する。制御信号を負荷に流さないように並列共振回路を利用する。制御信号が No.1 に直接入力し、No.1 の転送装置から No.2 に、No.2 の転送装置から No.3 の順に制御信号が次々に転送される。

実験条件は電源電圧：20 [V]，制御信号：100 [kHz]・3 [Vp-p]の正弦波，出力電流：2 [A]，負荷抵抗：40 [ $\Omega$ ]としている。

実測データを Fig.5-24(b)と(c)にまとめる。これらの波形は遮断装置の出力電圧である。Fig.5-24(b)は遮断装置の投入動作を示し、 $t>0$  [sec]のところで制御信号が出て、すぐに全部の遮断装置に転送され、各装置は約 0.02 [sec]後に投入動作を終えている。当然ながらリレーには遅延のばらつきがあるので、実際の遅延時間も同じではなかった。Fig.5-24(b)の No.3 のように、動作が遅れすぎることがあり、そこに測った電圧が負になることがあったものの、それはまだ動作していない遮断装置の出力側の陰極に直列電圧がかかることで、測った電圧が負になったことである。 $t=0.023$  [sec]前後に正で安定になった。5.3.4 節にシミュレーターで投入の際に振動が発生する原因を分析した。Fig.5-24(b)の実験データから見ると、同じ現象が発生していたので、同じ原因と考える。

同じく制御信号を止めると遮断装置が自動的に開放する。Fig.5-24(c)のように  $t=0.4$  [sec]付近で制御信号をとめ、No.1 が  $t=0.8$  [sec]付近で（約 0.4 秒遅延を経て）開放し、主回路の電圧も消失した。ところが No.1 の転送装置には制御信号がまた残存しているので No.2・3・4 は投入している。No.1 が完全に開放してから残存信号が止まり、ばらつきのある遅延（このばらつきもリレーの特性）を経て開放動作をする。

一方、開放操作をしてから配線内の電圧が全部消えるまでには過渡時間が必要である。その原因は出力側の制御信号をピックアップするコンデンサと転送装置のカップリングトランスに貯まったエネルギーであり、これを開放するために時間を要するからである。その遅延時間が約 1 [sec]必要である。No.1 では開放に伴う過渡時間において、負電圧が発生する。図のように  $t=1.0$  [sec]から約 0.5 [sec]間であるが、それは遮断装置の開放動作後、主回路の電圧も消えたので陽極が 0 [V]になるものの、ストリングにまだ投入している遮断装置の直列電圧が陰極にかかることで、測った電圧が負になったものである。



(a) 実験回路図

(b) 投入動作



(c) 開放動作

Fig.5-24 直列接続している遮断装置の投入・開放動作

# 第6章

## 結論

## 今後の課題

## 6.1 出力改善に関する検討の結論と今後の課題

本研究の結論として、太陽光発電システムに対する改良案を提案した。これは：

- 二分の一分断法（循環ループあり）を用いる
- MPPT 回路として MPPT 付定電圧制御昇圧回路を用いる

という二つの特徴を持ち、これによって開発目標とした 5 項目を全て達成した。具体的には Table.6-1 にまとめるが、その詳細は以下の通りである。

太陽電池アレイ回路の分断化は従来の直並列接続するアレイ回路を短絡ブリッジで分断化することである。分断化手法が多様であるので、代表的なブリッジリンク（BL 法）・全分断法（TCT 法）及び蜂の巣分断法（HC 法）を解析・シミュレーションした。さらにブリッジリンク（BL 法）を実機検証した。結果として部分陰での二分の一分断化アレイ回路にとって、循環ループありの場合に最大の出力電力が獲得できた。

MPPT 付定電圧制御昇圧回路は従来の開ループ昇圧回路にフィードバック回路を追加し、閉ループ化することで MPPT 制御アルゴリズムを導入することである。シミュレーションソフトウェアでこの 2 つの改良案と従来システムと比較し、結果とする INC 法付定電圧制御昇圧回路＋分断化アレイ回路の有効性を確認した。以下の研究はこの回路で行った。

その上に、ブリッジ電流の利用法の提案は、異なる分断法に対応するブリッジ電流の利用法も異なるので、BL 法循環ループなしの手法に一位陰・二位陰等様々な部分陰の位置を判定する方法を提案した。今後の課題とする判定の精度を向上するとともに他の分断法に対応するように k-NN 法を提案する予定である。

更に、シミュレーションの精度と正確性を向上するために、「天気データの導入」・「太陽電池モジュールの表面温度計算」や「発電量の統計」などの機能も開発した。ブリッジ電流のデータを使用し計算することで部分陰の位置を正しく判断できる見込みが得られた。なお、実際の天気データを利用し、多様な天気・気温が太陽光発電システムへの影響をシミュレーションによって確認した。なお、安定的に室内実験を可能とする人工光源を自作した。最大で太陽光の約 40% の出力能力を有することがわかった。

本研究に達成した目標を Table.6-1 にまとめた。

Table.6-1 出力改善に関する研究目標の達成状況

内容	目標
アレイ回路の分断化手法	①部分陰での出力電力を 20%向上とする
	②10 年間の運転時間に対して故障率 2%未満

昇圧回路 についての 改良	③昇圧率・目標 1.5 倍 ④アレイ回路電圧の変動範囲： ➤ リップル電圧 3 [V <sub>p-p</sub> ]未満 ➤ 500 [W/m <sup>2</sup> ]以上の放射照度でアレイ回路の電圧を 250 [V]付近に安定すること
部分陰の 位置判定	⑤一位陰（部分陰のかかる太陽電池モジュールが 1 箇所となる 場合）の場合に正確に判定できること

開発項目ごとの達成状況について述べれば、次のとおりである。

①部分陰での出力電力を 20%向上とする：

Table.4-5 見られる通り、従来の方法（同表左端）に比べ、本研究で提案するシステムと制御手法により、大きな出力電力が得られた。電力向上は 21.88%であり、これは分断化を行わない場合には得られない向上率で、INC 法と P&O 法は両方良い値となっている。研究開発目標である 20%向上も達成された。

②10 年間の運転時間に対して故障率 2%未満：

4.1.6 に説明した通り、故障率はシステムで使用している部品数が増えるほど増大する。この意味で全分断法や蜂の巣分断法では信頼性が低く、故障率 2%の目標を達成できないことが判った。それに対して二分の一分断の場合の故障率は 1.69%でこの目標を達成した。

③昇圧率・目標 1.5 倍：

従来のシステム、制御で 226.4 [V]だった直流電圧が提案システム制御では 356.9 [V]となっている。これは従来値基準 158%に相当し、研究開発目標を満たしている。電圧レベルの上昇により、損失に低減している。

④アレイ回路電圧の変動範囲：

- 従来のリップル電圧  $V_{p-p}=0.34$  [V]に対して提案システムの  $V_{p-p}=1.12$  [V]と若干高くなったが、3 [V]の目標以内に収めることができた。
- 変わる放射照度に対するアレイ回路出力電圧にとって、従来のシステムが不安定であり、提案システムの結果は 500 [W/m<sup>2</sup>]以上の放射照度でアレイ回路の電圧を 250 [V]付近に安定する。目標を達成と考える。

⑤一位陰の場合に正確に判定できること：

4.3 節では陰の位置やその変化パターンを種々に変化して判定の成否を調べたが、一位陰については全てのケースで正しい判定が行えた。これより研究開発目標は達成したと考えられる。

今後の課題として k-NN の判定アルゴリズムを完成・改善する予定である。なお、現在既に設置された太陽光発電システムについて点検や故障検出などの課題が出ているので、本研究に開発された技術を適用するように着手する。特に 6.2 節に述べる研究内容と連携する手法を模索する。

## 6.2 安全性向上に関する検討の結論と今後の課題

本論文では太陽電池モジュール間の直流電圧の遮断装置に用いられる遠隔操作遮断装置の主要回路を提案した。その構成から、スイッチの選択と回路の電力損失や制御信号周波数の選択及びフィルターの特性を検討した。開発した遮断装置を PSpice で数値シミュレーションし、回路の各部分のパラメータを細かく調整した。さらに、遮断装置をプリント基板で自作し、回路の動作と性能を測定した。その結果、試作した遮断装置が期待通りに動作することがわかった。更に複数個の電源と遮断装置を直列運転することを実機にて検証した。

この遮断装置を太陽光発電システムの太陽電池モジュールごとにつけると想定する。

なお、提案装置は単純に直流電圧を遮断することだけではなく、制御信号をデジタル通信に切り替えると、マイコンの導入も可能であり、太陽電池アレイ回路の直並列接続を切替える等の機能もできると考える。

安全性向上に関する研究開発目標について項目 (Table.6-2) ごとに達成状況を検討すると以下のようなになる。

Table.6-2 出力改善に関する研究目標の達成状況

内容	目標
遮断装置 単体性能	①投入：<100 [msec], リレーの種類次第 開放：<1 [sec]
	②電源電圧が 10 [V]以上の時に投入・開放動作可能
装置省エネ化	③最低効率 90%以上
通信の安定化	④ノイズにて誤動作しないこと (制御信号電圧 20 [V]まで)
直列運転	⑤装置 2 個～4 個の直列運転ができるようにする

### ①投入・開放の動作速度：

実験により、投入動作は約 0.02 秒に完了でき、設計上にリレーの機械動作時間と関係ある。開放動作は約 0.7 秒に完了でき、リレーの制御回路により増減することがある。両者は設定した目標以内に達成したと考えられる。

### ②電源電圧が 10 [V]以上の時に投入・開放動作可能：

実験により、電源電圧が 6 [V]以上にすると、遮断装置の投入・開放動作がうまくできることが判った。目標とする 10 [V]と比べ、達成したと考える。

### ③最低効率 90%以上：

Table.5-3 に試作結果がまとめられているが、最高効率は 97.9%と十分に高く、研究開発目標を満足している。

④ノイズにて誤動作しないこと（制御信号電圧 5 [V]以下）：

シミュレーションと自作印刷基板による実測の結果，使用するファンクションジェネレータによる装置的限界（出力電圧  $V_p=20$  [V]）までにおいて誤動作は発生しなかった。更に太陽光発電システムのパワーコンディショナーのギャリア周波数の高調波成分についても誤動作の原因になるほどのレベルには無いことを確認した。目標を満足したと言える。

⑤装置 2 個～4 個の直列運転ができるようにする：

Fig.5-24(b)(c)以降に示されている通り，4 個の遮断装置を自作して直列接続し運転したところ，電氣的過渡現象のために若干の遅延が発生したものの，動作に支障は発生しなかった。

今後の課題として，遮断装置の安定性を向上しながら上述の機能の実現を目指す。なお，今までの開発はアナログ回路技術を使用したため，今後マイコンなどの計算装置を導入し，遮断装置の知能化に着手したい。

# 付録 第1章

## 太陽光発電システム 各部分の特性

## F1.1 太陽電池

### F1.1.1 太陽電池と発電原理

太陽電池は光エネルギーを電気エネルギーに変換する電力機器である。太陽電池に入射した光のエネルギーは太陽電池内部の電子によって吸収され、電力として太陽電池の外部へ出力される。その仕組みは光起電力効果[F1-1][F1-2]という。

具体的な原理と図は以下のように示される：

1. p型とn型の半導体を接合すると、接合部付近では伝導電子と正孔がお互いに拡散して結びつく「拡散電流」が生じる。
2. 伝導電子と正孔が打ち消しあった結果、接合部付近にこれらキャリアの少ない領域が形成される。これを「空乏層」という。また、伝導電子と正孔をそれぞれn型・p型領域へ引き戻そうとする内蔵電界および内蔵電界に従ってキャリアが動く「ドリフト電流」が生まれる。
3. 熱平衡状態においては、拡散電流とドリフト電流が釣り合い、フェルミ準位は一定となる。
4. ここで半導体の禁制帯幅よりも大きなエネルギーを持つ光をpn接合に照射し、接合領域において価電子帯の電子が光を吸収すると、禁制帯を超えて励起されて伝導電子となり、その跡には正孔が残る。この電子の発生によってドリフト電流が増大し、熱平衡状態が崩れる。空乏層に形成されている内蔵電界によって、伝導電子はn型半導体に、正孔はp型半導体に移り、起電力が発生し、光起電力という。
5. p型半導体とn型半導体に電極を取り付けると、それぞれ負極・正極となつて直流電流を外部に流れ出すことができる。

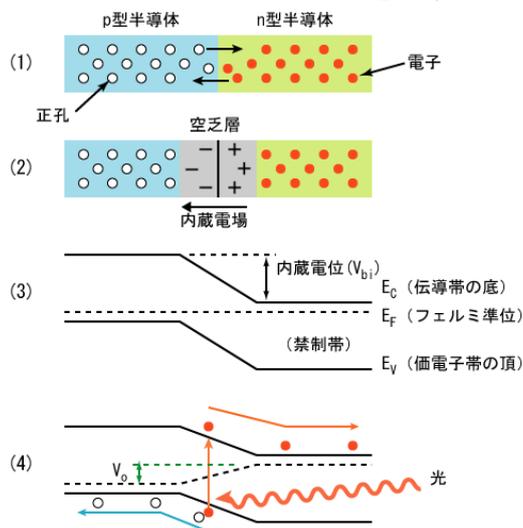


Fig.F1-1 光起電力効果

放射照度による影響：放射照度とは光のスペクトルとエネルギー量との積分である。地球表面 (@AM1.5) に受ける太陽光スペクトルは Fig.F1-2 に示す。

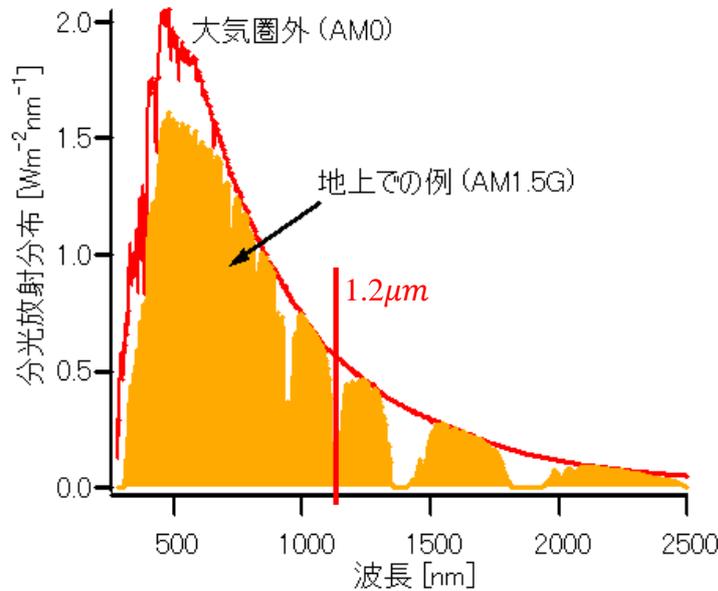


Fig.F1-2 太陽光スペクトル

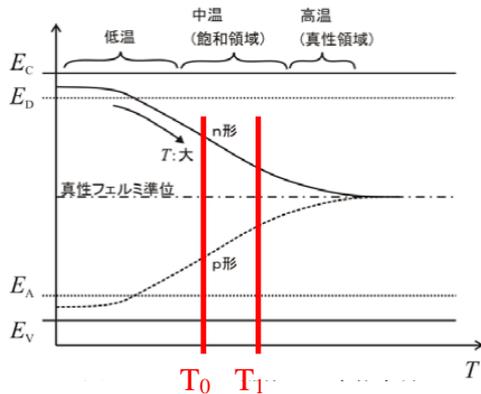
その場所に受ける放射照度は Fig.F1-2 の黄色部分の面積である。いわゆる、光のエネルギーは光子のエネルギー分布を統計するものである。結晶シリコンの禁制帯幅は 1.12 eV であり、太陽電池に用いた場合、近紫外域から波長 1.2 μm 程度までの光を吸収して発電できる。よって、太陽電池セルに利用できる範囲は Fig.F1-2 の赤い線の左側である。

放射照度の変化について、例えば光が半透明なプラスチック（一部の波長範囲の吸収を考えず、色なしのこと）を透過する場合は、全波長範囲のエネルギーの一部がプラスチック材料に吸収され、他の部分が透過する。スペクトル図で表すと各波長の放射エネルギーが比例的（透過率との掛け算）に減少する。分布的に全波長範囲の光子の数量が減少する。もしこの弱体化した光を太陽電池セルに照らすと、有効なエネルギーを有する光子（波長<1.2 μm）の数量が減少したので、光起電力効果で誘起する電子の量も減る。巨視的に太陽電池セルの出力低下が発生する。

温度の変化について、前述の 3 に述べる通りに、熱平衡状態においては、拡散電流とドリフト電流が釣り合い、フェルミ準位は一定となる。逆に温度が変化する場合に、フェルミ準位も変わる。Fig.F1-3 に示すようにフェルミ準位には温度を高めると真性フェルミ準位に寄る傾向がある。

### フェルミ準位の温度依存性

p 形半導体のフェルミ準位の温度依存性は n 形半導体の場合と逆になる。



#### i) 低温

$E_F$  は  $E_C$  と  $E_D$  の中央から温度上昇により低下する。

#### ii) 中温

温度  $T$  の増加に従って  $E_F$  は急激に低下する。

#### iii) 高温

真性フェルミ準位と同じく禁制帯のほぼ中央に位置する。

Fig.F1-3 フェルミ準位の温度依存性

一般的に太陽電池セルの動作温度は Fig.F1-3 の中温領域である。よって温度が  $T_0$  から  $T_1$  に変化すると、pn 接合のフェルミ準位が真性フェルミ準位に近づく傾向である。新たなフェルミ準位から伝導帯（価電子帯）の距離が増加し、フェルミ準位を一定にするために、禁制帯の厚さが増加する。この場合に電子の励起に必要な光子エネルギー量も上昇し、転換効率が低下する。このとき、太陽電池セルは出力低下する。巨視的にセルの温度が上昇すると、キャリアが活発化による拡散電流が増加し、空乏層が厚くなり、セルの開放電圧（ $\cong$  内蔵電位  $V_{bi}$ ）が減る。

こういうことを防ぐために、空乏層の厚さを元にしたほうが良いと考えられる。太陽電池セル外部の調整により、人工的にドリフト電流を増加させることができれば、増加させたドリフト電流と活発化した拡散電流が釣り合い、 $T_1$  の空乏層の厚さを  $T_0$  の厚さと同じくすることができる。この場合に電子の励起に必要な光子エネルギー量も元に戻り、転換効率が守れる。しかし、励起した電子の一部がドリフト電流の増量として使用されるので、外部に達する電子が減り、出力が  $T_0$  の場合より少々低下する

### F1.1.2 太陽電池の種類

本論文では太陽電池を論じない。基礎知識として太陽電池の材質・技術及び工法の分別を単純に引用する。太陽電池はよくセル・PVセルと言われている。以下は太陽電池セルと呼ぶ。

#### F1.1.2.1 シリコン系

シリコンを用いる太陽電池は、a.材料の性質の観点からは、大きく結晶シリコンとアモルファスシリコンに分類することができる。またその b.形態の観点から、薄膜型や多接合型などを分別することができる。その形式や性能は非常に多

様であり、近年は複数の型を複合させたものも実用化されている。このため、ここに挙げた分類法も絶対のものではないことを付記しておく。太陽電池に用いられるシリコンの純度・格子欠陥は集積回路用に比べて基準がゆるく、これまでは集積回路用のシリコンが用いられてきたが、太陽電池の生産量が増加するに従い、ソーラーグレードのシリコン材料の供給が望まれてきた。シリコンの高純度化には従来、水素とシリコンを反応させて蒸留して純度を高める化学的な手法が使用されていたが、近年は冶金的な手法により、真空中で電子ビームを照射する事によってシリコン中の不純物の気化精製・凝固精製を行い、不純物を除去する事により、純度を高めるプロセスも開発されている。

#### a.材質の観点による分類

結晶シリコンの禁制帯幅は 1.12 [eV] であり、太陽電池に用いた場合、近紫外域から波長 1.2 [ $\mu\text{m}$ ]程度までの光を吸収して発電できる。間接遷移型の半導体であるため光吸収係数が低く、実用的な吸収量を得るには最低 200 [ $\mu\text{m}$ ]程度のシリコン層が必要とされてきた。しかし表面テクスチャなどを用いた光閉じ込め技術が発達してきており、近年は結晶シリコンであってもシリコン層が数 [ $\mu\text{m}$ ]~50 [ $\mu\text{m}$ ]などと非常に薄く、薄膜太陽電池に分類できるものも開発されている。

##### 1.1a 単結晶シリコン型

高純度シリコン単結晶ウエハを半導体基板として利用するもので、最も古くから使われている。変換効率は高いが高純度シリコンの利用量が多く、生産に必要なエネルギーやコストが高くなる。そのため近年は下記の多結晶シリコンや薄膜シリコン太陽電池への移行が進んでいる。通常は c-Si と略記される。

##### 1.2a 多結晶シリコン型

結晶の粒径が数 mm 程度の多結晶シリコンを利用した太陽電池。他のシリコン半導体素子の製造過程で生じた端材やオフグレード品のシリコン原料を利用して製造できる。単結晶シリコンに比べると面積あたりの出力(変換効率)は落ちるが、生産に必要なエネルギーは少なく、エネルギー収支や EPT・GEG 排出量の面では単結晶シリコンより優れる。コストと性能のバランスの良さから、現在の主流となっている。近年、薄型化するコスト削減技術の競争が進んでいる。また、ガラス上に非常に薄い多結晶シリコン太陽電池を形成する CSG (または SOG)技術の普及も有望視されている。化学気相成長により成膜するため生産過程で  $\text{SiH}_4 \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2$  などのガスを使用する。poly-Si と略記される。

##### 1.3a 微結晶シリコン型[F1-3]

微細な結晶で構成された薄膜を化学気相成長法(略称 CVD 法、以下は CVD と呼ぶ)などにて製膜するものである。多結晶型の 1 種と見なせるが、製膜条件によってはアモルファス的な性質も併せ持つ。比較的新しい技術で、インゴット

を切断する手間が省け・資源の使用量も削減できるほか、製法によっては 200°C 程度の低温での製膜が可能で基板を選ばない、などの特長がある。化学気相成長により成膜するため生産過程で  $\text{SiH}_4 \cdot \text{PH}_3 \cdot \text{B}_2\text{H}_6 \cdot \text{GeH}_4 \cdot \text{H}_2$  などの気体を使用する。通常は  $\mu\text{c-Si}$  と略記される。

#### 1.4a アモルファスシリコン型

シランガスから化学気相成長させてできるアモルファスシリコンを利用した太陽電池である。形態的には薄膜シリコン太陽電池にも分類できる。アモルファスシリコンは、タウツギャップと呼ばれる通常 1.75~1.8 eV 程度のエネルギーギャップと、それより小さな裾準位を介したエネルギーギャップを持つ。結晶シリコンに比べてエネルギーギャップが大きいため、高温時も出力が落ちにくい特性を持つ。太陽電池にそのまま用いた場合は主に 700 nm 以下の短波長の光が利用され、見た目には赤っぽく見える。結晶構造の乱れにより、光学遷移にフォノンの介在を必要とせず、光吸収係数が高い。このため 0.5  $\mu\text{m}$  程度の厚さでも実用になり、使用するシリコン原料が少なく、エネルギーやコスト的にも有利である。極端な低照度下での効率が低いことや、蛍光灯の短波長光に感度があることから、主に電卓など室内用途に使われてきた。太陽光で劣化しやすいのが欠点だったが、技術の進歩により長寿命化され、近年は屋外用にも市販されている。エネルギー変換効率が 10%以下と低い（設置面積が大きくなる）のも欠点だったが、多結晶シリコン等と積層した多接合型とすることで高性能化されている。またタウツギャップの大きさはドーピングによって 1~2 [eV]程度の範囲で可変であり、これを利用してアモルファス層のみで構成された多接合型太陽電池も実用化されている。近年は下記の薄膜太陽電池の一種として論じられることも多い。化学気相成長により成膜するため生産過程で  $\text{SiH}_4 \cdot \text{PH}_3 \cdot \text{B}_2\text{H}_6 \cdot \text{GeH}_4 \cdot \text{H}_2$  などの気体を使用する。また、アモルファスシリコン太陽電池の開発過程で培われた大面積ガラス基板での半導体製膜技術は TFT 液晶ディスプレイパネルの生産技術にも役立った。通常は  $\text{a-Si}$  と略記される。

#### b.形態の観点による分類

##### 1.1b 薄膜シリコン型

シリコン層の厚みを薄くすることで、使用原料・生産に要するエネルギー・コストなどの削減をはかったもの。比較的新しい技術で、様々な形態が存在するためひとくくりにするのは難しい。広義には省資源化の意味で、従来の数百 [ $\mu\text{m}$ ] よりも薄いもの全般（例えば 100 [ $\mu\text{m}$ ]以下）を指す。狭義には柔軟性なども十分に得られる厚みの意味で、例えば 10 [ $\mu\text{m}$ ]以下のものを指す。シリコン融液から表面張力でリボン状に引き出すストリングリボン法を用いた型や CVD 法などを用いる微結晶型などが代表的である。厚みは生産方法の選択によって 100 [nm]単位から数百 [ $\mu\text{m}$ ]以上まで連続的にカバーでき、目的に応じて使い分けら

れる。インゴットから切断したウエハを用いて製造する場合は通常数百  $[\mu\text{m}]$  単位になるのに対し、融液から直接薄膜の形にするリボン法などでは 100  $[\mu\text{m}]$  以下、CVD 法などを用いた場合（アモルファス型や微結晶型など）では 0.5～数  $[\mu\text{m}]$  まで薄くなる。薄膜のままでは充分に入射光を吸収できないため、表面テクスチャや中間層を用いて光学的特性を制御し、入射光の利用率を高める工夫が施される（ライトトラッピング）。効率の低下分よりも生産時の使用エネルギーやコストが多く削減できるため、環境負荷の観点から優秀なものが多い。

#### 1.2b ハイブリッド型（HIT 型）[F1-4]

結晶シリコンとアモルファスシリコンを積層した太陽電池である。通常の結晶シリコンに比して変換効率が高く、温度特性も良いなどの特長を有する。シリコンの使用量が減らせる他、両面受光型にも出来る。日本の三洋電機が主な製造者である。なお、吸収波長域の異なる材料同士を積層するという点では下記が多接合型太陽電池に似るが、pn 接合は 1 つ（単接合）である。特許の保護期間が切れるとともに、2020 年から中国の太陽電池セル生産会社では大変注目されている技術で、今後大量生産する予定があり、生産コストを更に削減することが期待できる。[F1-5]

#### 1.3b 多接合型（タンデム型）

吸収波長域の異なるシリコン層を積層したもの。アモルファスシリコンと各種の結晶シリコンを積層したものの他、通常の a-Si に吸収波長域の異なる a-SiC や a-SiGe を積層したものなどが開発・実用化されている。高効率で温度特性などに優れるものが多い。

#### 1.4b 球状シリコン型[F1-6]

球状シリコン型太陽電池とは、無数の球状シリコン粒子（直径 1  $[\text{mm}]$  程度）と、集光能力を上げる直径 2～3  $[\text{mm}]$  の凹面鏡（電極を兼ねる）を組み合わせた太陽電池のことである。一般的な結晶シリコン型の 1/5 程度のシリコン使用量で、アモルファスシリコンよりも高い変換効率が期待できる方式である。球状シリコンの生産方法は、プラズマで溶かしたシリコン液滴を 1～2 秒程度自由落下で滴下させ、表面張力でシリコン液滴を球状とし、落下中にレーザー照射により結晶化させるというものである。個々のシリコン粒子は単結晶である。高純度シリコン原料の供給が追いつかない状況が続く中、シリコンの供給状況に影響されにくく、生産工程も簡易なことから、コストを下げやすい方式として普及が期待されている。また基板が板状ではないため、曲面にも設置可能でかつ軽量であるメリットがある。

#### 1.5b 電界効果型

従来の pin 接合構造を持つアモルファスシリコン型の p 型窓層の役割を、絶縁された透明電極から電界効果によって誘起される反転層に置き換えた構造を

持つ。p型窓層内で再結合により失われていたキャリアを電界によって速やかに分離する効果等により、変換効率を飛躍的に改善するものと期待される。研究が行われていた1996年当時の従来型に比べ最大50%の効率改善がシミュレーションより得られたが、製造プロセス等の課題により実験レベルでの大幅な効率改善には至っていない。

### F1.1.2.2 化合物系

#### 2.1 InGaAs 太陽電池

シャープが開発した。InGaAs（インジウムガリウムヒ素）を用い、3層の結晶構造がほぼ一致するように原材料の元素を掛け合わせ、さらに層の間に緩衝材を入れて、層のひずみを解消した。しかしヒ素を使うので用途に制限がある。

#### 2.2 GaAs 系太陽電池

単結晶のGaAsを用いるもので、禁制帯幅1.4[eV]で太陽光のスペクトルに良くマッチし、単接合セルでは最も高い変換効率を出せる。しかしヒ素を使うので用途に制限があり、宇宙用など、特に高い変換効率が必要な用途に用いられている。

#### 2.3 CIS系（カルコパイライト系）太陽電池

新型の薄膜多結晶太陽電池。光吸収層の材料として、シリコンの代わりに、Cu・In・Ga・Al・Se・Sなどから成るカルコパイライト系と呼ばれるI-III-VI族化合物を用いる。代表的なものはCu(In,Ga)Se<sub>2</sub>やCu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub>・CuInS<sub>2</sub>などで、それぞれCIGS・CIGSS・CISなどと略称される。製造法や材料のバリエーションが豊富で、低コスト品から高性能品まで対応できるのが特長。また多結晶であるため、大面積化や量産化に向く。フレキシブルなものやカスタマイズ品も作りやすい。シリコン太陽電池が苦手とする分野から実用化が始まっているほか、禁制帯幅が材料次第で自由に変えられることから将来の多接合型太陽電池への応用も期待されている。

CIGS太陽電池はCu(In・Ga)Se<sub>2</sub>という化合物からなる太陽電池である。携帯電話で搭載できる程度に面積が小さくて軽くとも、大量の電力を生み出す高効率の太陽電池として注目され、利点として次が挙げられる。

- 光電変換効率が高い。
- 数μmの薄さでも十分に機能する。
- 経年劣化が少ない。
- 黒一色で色合いが落ち着いている。

#### 2.4 CZTS (Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>) 太陽電池

めっきプロセスを用いたCZTS (copper zinc tin sulfide) 薄膜は近年開発が始まったシリーズである。上記のCIS系に形態が似るが、利用する材料がより豊富かつ安価なのが特長であるといえる。

## 2.5 CdTe/CdS 系太陽電池

テルル化カドミウム (cadmium telluride, CdTe) 薄膜を用いた太陽電池で、2枚のガラスに太陽電池を挟み込んだ形態のモジュールが代表的である。毒物であるカドミウムを用いるが、少量でしかも安定した化合物がモジュールに閉じこめられているため、環境負荷の低い太陽電池とされている。

## 2.6 その他

InP 系太陽電池, SiGe 系太陽電池, Ge 太陽電池, ZnO/CuAlO<sub>2</sub> 太陽電池 (透明な太陽電池) などがある。

### F1.1.2.3 有機系

上記のシリコンや無機化合物材料を用いた太陽電池に対し、光吸収層 (光電変換層) に有機化合物を用いた太陽電池も開発されている。製法が簡便で生産コストが低くでき、着色性や柔軟性などを持たせられるなどの特長を有する。変換効率や寿命に課題があるが、実用化されれば将来の市場で大きなインパクトが期待されるため、開発が競われている。

#### 3.1 色素増感太陽電池[F1-7]

有機色素を用いて光起電力を得る太陽電池。代表的なものはグレッツェル型 (または湿式太陽電池) と呼ばれる型式のもので、2枚の透明電極の間に微量のルテニウム錯体などの色素を吸着させた二酸化チタン層と電解質を挟み込んだ単純な構造を有している。製造が簡単で材料も安価なことから大幅な低コスト化が見込まれ、最終的には現在主流の多結晶シリコン太陽電池の1~数割程度のコストで製造できると言われている。また軽量・着色も可能などの特長を持つ。現在の課題はルテニウムや白金のような高価な金属が使用されている事と効率と寿命であり、技術的改良が進められている。電解液の蒸発を如何に防ぐかが重要であり、固体化などの技術開発が進められている。

#### 3.2 有機薄膜太陽電池[F1-8]

導電性ポリマーやフラーレンなどを組み合わせた有機薄膜半導体を用いる太陽電池。次世代照明/TVの有機ELの逆反応として研究が進展した。ロールツーロールで印刷による製造が可能になるため、上記の色素増感太陽電池よりもさらに構造や製法が簡便になると言われており、また電解液を用いないために (色素増感と比べると) 柔軟性や寿命向上の上でも有利なのが特長である。21世紀に入ってから盛んに開発が行われるようになってきている。課題は変換効率と寿命である。

### F1.1.2.4 ペロブスカイト型[F1-9]

ペロブスカイト結晶を用いた太陽電池。2009年に桐蔭横浜大学の宮坂力教授の研究室によってハロゲン化鉛系ペロブスカイトを利用した太陽電池が開発さ

れた。エネルギー変換効率は 2009 年当時の  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  を用いた 3.9%から 2016 年には最大 21.0%に達するという著しい性能向上を示し、次世代の太陽電池として期待される。

#### F1.1.2.5 量子ドット型

使用する材料がまだ特定されていない太陽電池として、量子効果を用いた太陽電池が検討されている。第三世代型太陽電池とも呼ばれる。例えば pin 構造を有する太陽電池の i 層中に大きさが数[nm]～数 10 [nm]程度の量子ドット構造を規則的に並べた構造などが提案されている。この量子ドットの間隔を調整することで、真性半導体（シリコンや GaAs など）の禁制帯中に複数のミニバンドを形成できる。これにより、単接合の太陽電池であっても、異なる波長の光をそれぞれ効率よく電力に変換することが可能になり、変換効率の理論限界は 60%以上に拡大する。現在の一般的な半導体プロセスよりもさらに微細な加工プロセスの開発が必要である。

## F1.2 シリコン系太陽電池セルの数値モデル

### F1.2.1 数値モデル

現在シリコン系の太陽電池セルは市販品の主流である。太陽光発電システムを論じる前に太陽電池セルの発電原理と数値モデルについて説明する。太陽電池セルの電気的な数値モデルは Fig.F1-4 に示される通りである。

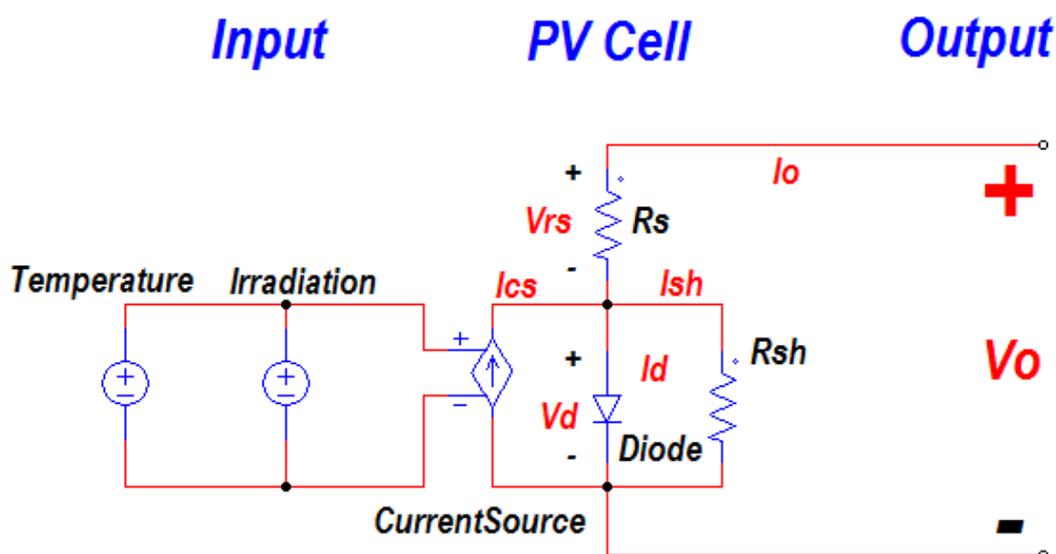


Fig.F1-4 太陽電池セルのモデル

一枚のセルの構成は：

$I_{cs}$ ：光起電力効果を表す電流源

$Diode$ ：ドリフト電流が通過するダイオード

$R_s$ ：材料自身及び電極などとの接続による直列抵抗

$R_{sh}$ ：ドリフト電流が空乏層を通過する際の等価並列抵抗

である。太陽電池の光誘起電流などの式は以下のようなになる[F1-10]。

$$I_{cs} = \left( I_{sc0} \times \frac{S}{S_0} \right) + C_t \times (T - T_{ref}) \dots\dots\dots(F1-1)$$

$$I_d = I_0 \times \left( e^{\frac{qV_d}{AkT}} - 1 \right) \dots\dots\dots(F1-2)$$

$$I_0 = I_{s0} \times \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \times e^{\frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \dots\dots\dots(F1-3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \dots\dots\dots(F1-4)$$

$$I_o = I_{cs} - I_d - I_{sh} \dots\dots\dots(F1-5)$$

$$V_o = V_d + V_{rs} = V_d + I_o \times R_s \approx V_d \dots\dots\dots(F1-6)$$

式の中で：

$I_{cs}$ ：光誘起電流 [A]

$I_{sc0}$ ：セルの短絡電流 [A] (@基準放射照度 1000 [W/m<sup>2</sup>]と基準温度 298 [K])

$S$ ：放射照度の入力 [W/m<sup>2</sup>]

$S_0$ ：基準放射照度 [W/m<sup>2</sup>]

$C_t$ ：温度係数 [A/K]

$T$ ：モジュールの温度 [K]

$T_{ref}$ ：基準温度 [K]である。

$I_{s0}$ ：基準ダイオード飽和電流 [A]

$q$ ：電子の電荷( $q = 1.6 \times 10^{-19}$ ) [C]

$k$ ：ボルツマン定数 ( $k = 1.3806505 \times 10^{-23}$ )

$V_d$ ：ダイオードの順電圧 [V]

$E_g$ ：太陽電池のバンドギャップエネルギー [eV]

$A$ ：太陽電池の理想係数である。

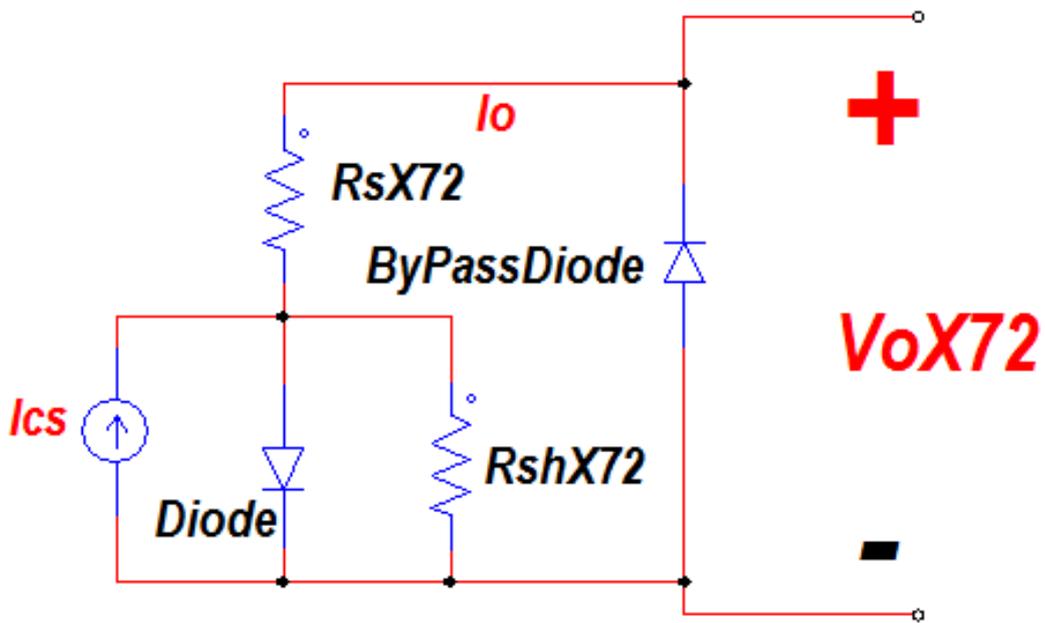
ここの短絡電流・温度係数と基準ダイオード飽和電流はセルの設計と製造に関する事項であるため、本論文では詳述しない、単に定数とする。

式(F1-6)の中で省略できる部分は  $V_{rs}$  である。太陽電池セルの直列抵抗が非常に小さいため (一枚のセル直列抵抗は約 $10^{-6}$  [Ω]レベルである)，計算上電圧  $V_{rs}$  が省略できる。しかし，太陽電池モジュールの経年劣化が進むと伴に，直列抵抗の増加傾向があり，並列抵抗の減少傾向もある。その点を利用すれば太陽電池モジュールの劣化検出や劣化の進捗判定が利用できる。

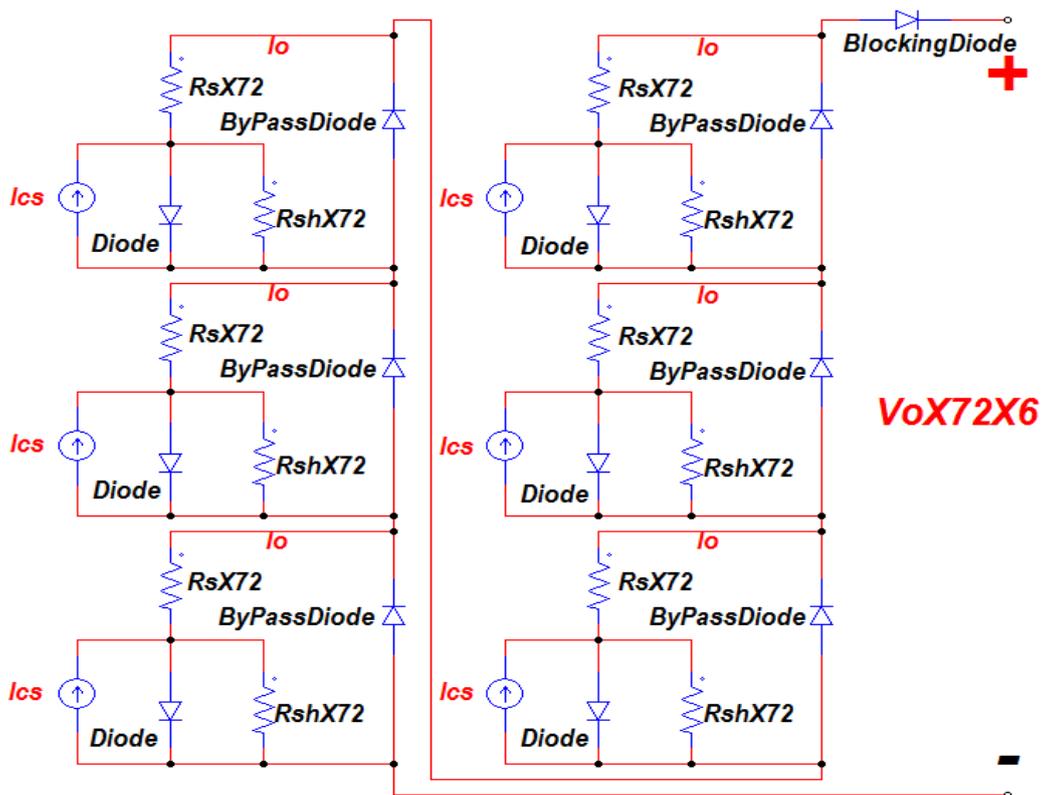
なお，モデルよりセルの出力電圧の本質はダイオードの順電圧 ( $V_o \approx V_d$ ) である。具体的には 0.6~0.7 [V] (シリコンの場合) しか出力出来ない。

### F1.2.2 太陽電池モデルの組み合わせ

太陽電池モジュールには多数の太陽電池セルが直列接続されている。すると，モジュールの数値モデルはセルのモデルを直列し，モデル内の抵抗  $R_s \cdot R_{sh}$  と出力電圧がセル数倍にすればいい。さらにそのモジュールの数値モデルを直列接続すれば，ストリングの数値モデルができる。モデル化したモジュールと太陽電池ストリング回路は Fig.F1-5 に示す。



(a) 太陽電池モジュール



(b) 太陽電池ストリング

Fig.F1-5 太陽電池モジュールと太陽電池ストリング回路のモデル化

Fig.F1-5 により，太陽電池ストリングは直列接続した複数枚の太陽電池モジュールであり，複数本の太陽電池ストリングを並列接続すると Fig.F1-6 のような従来の通常アレイ回路になる。

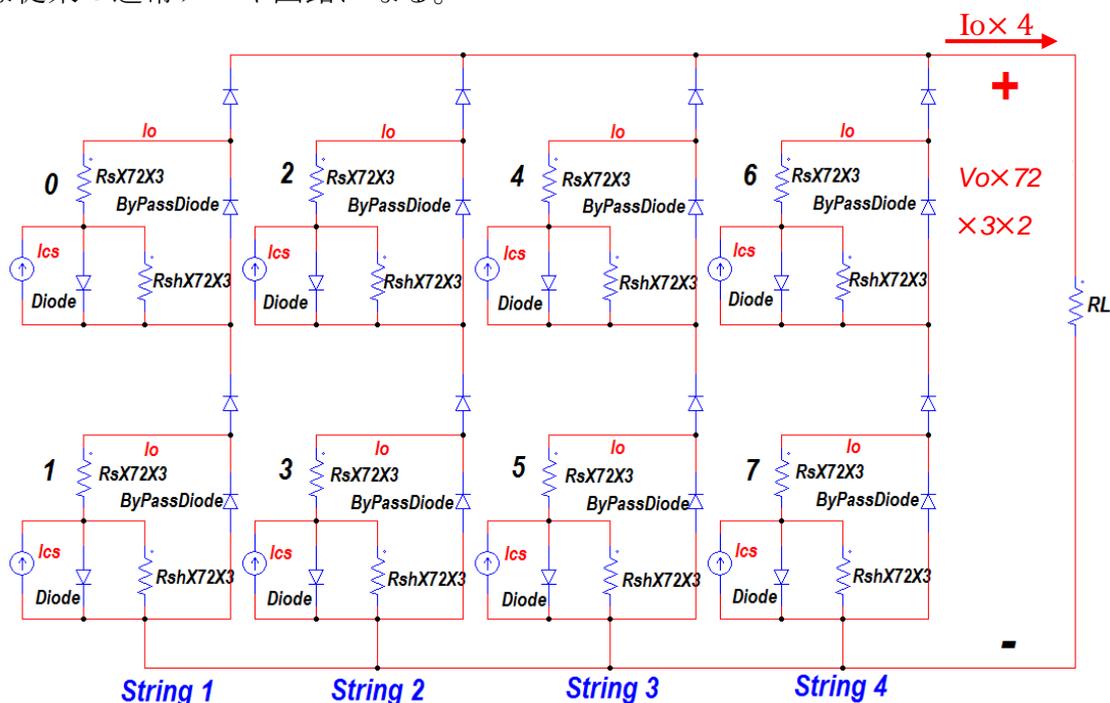


Fig.F1-6 太陽電池アレイ回路のモデル

Fig.F1-6 より， $V_o \times 72 \times 3 \times 2$  の表記では 72 がセル数で，3 が  $0 \cdot 1 \cdot 2 \dots$  のモジュール枚数で，2 が 2 分段でストリング 1 本を構成する。更に 4 本のストリングを並列接続すれば図のような太陽電池アレイ回路が構成される。

数値モデルを使用すれば，太陽電池・モジュールやアレイ回路内部の機構についての物理現象や原因等が解析できる。なお，本研究では主に Powersim 社が開発したパワーエレクトロニクス数値シミュレーションソフトウェア PSIM の太陽電池物理モデルを利用する [F1-11]。そのモデルの内部でも以上に述べる数値モデルが使われている。

## F1.3 太陽電池アレイ回路とその出力特性

### F1.3.1 太陽電池アレイ回路の構成

太陽電池アレイ回路は多くの場合，Fig.F1-7 のように構成される。太陽光発電システムの定格容量により，太陽電池モジュールの枚数は相異なるが，アレイ回路の構成はどのようなものであり，下図のような直並列接続回路である。

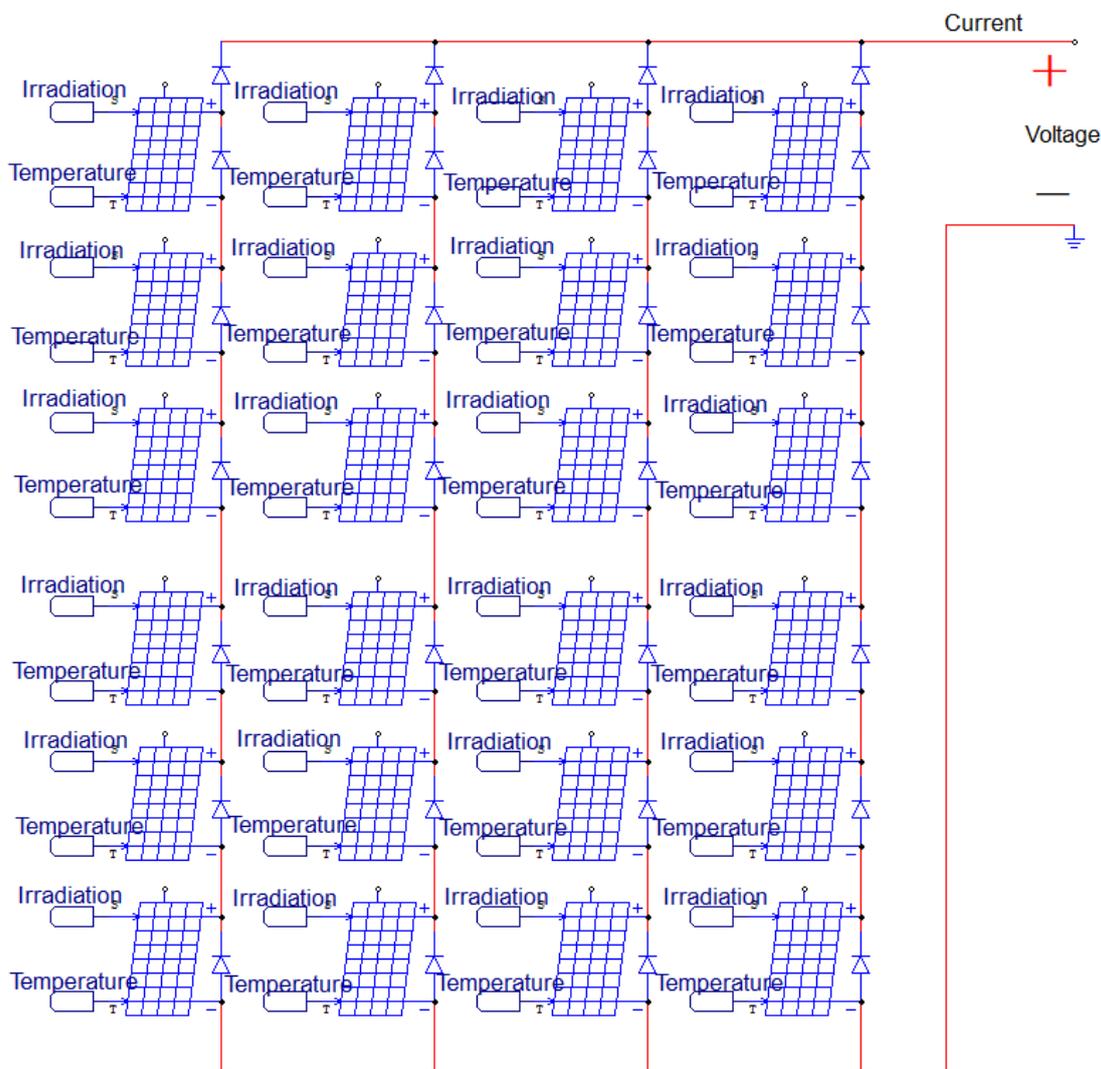


Fig.F1-7 太陽電池アレイ回路

前節の解析より，太陽電池セルの数値モデルを大量に直列接続するとモジュールが構成できる。太陽電池モジュールの数値モデルは太陽光の放射照度・温度を入力すれば，電圧・電流と電力を出力するものである。従って，放射照度と温度が違えば出力特性が変わるはずである。横軸が電圧で，縦軸が電流と電力で特性を表現するのは I-V カーブと P-V カーブである。

### F1.3.2 陰がない場合の出力特性

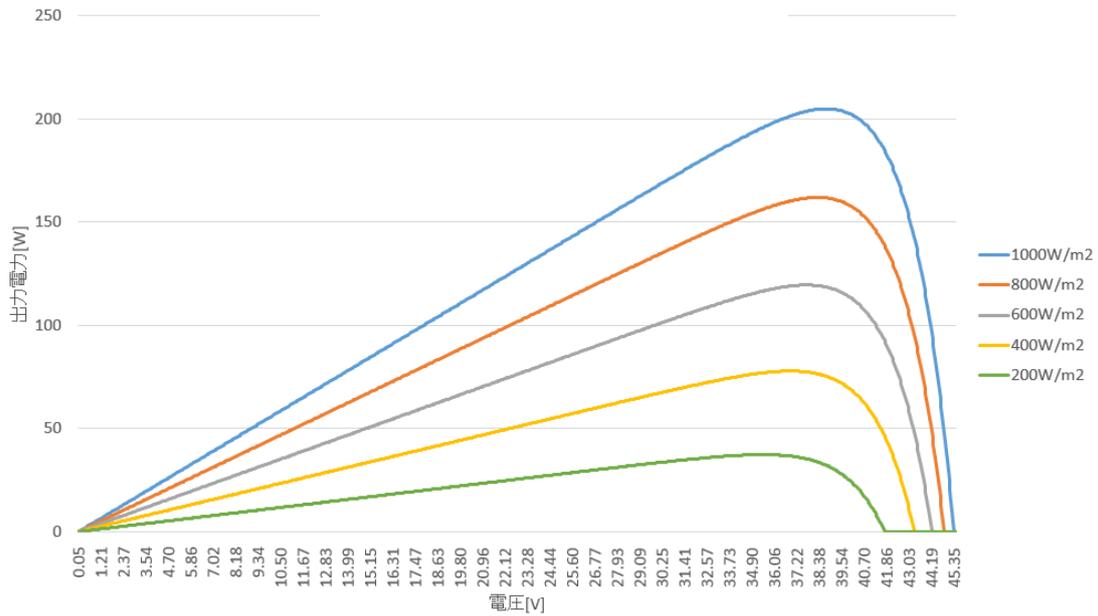
本節では 1 枚の太陽電池モジュール及び複数枚モジュールの太陽電池アレイ回路の特性を示す。シミュレーションで利用するモジュールの公称定格は Table.F1-1 にまとめられる。

Table.F1-1 太陽電池モジュールの公称定格

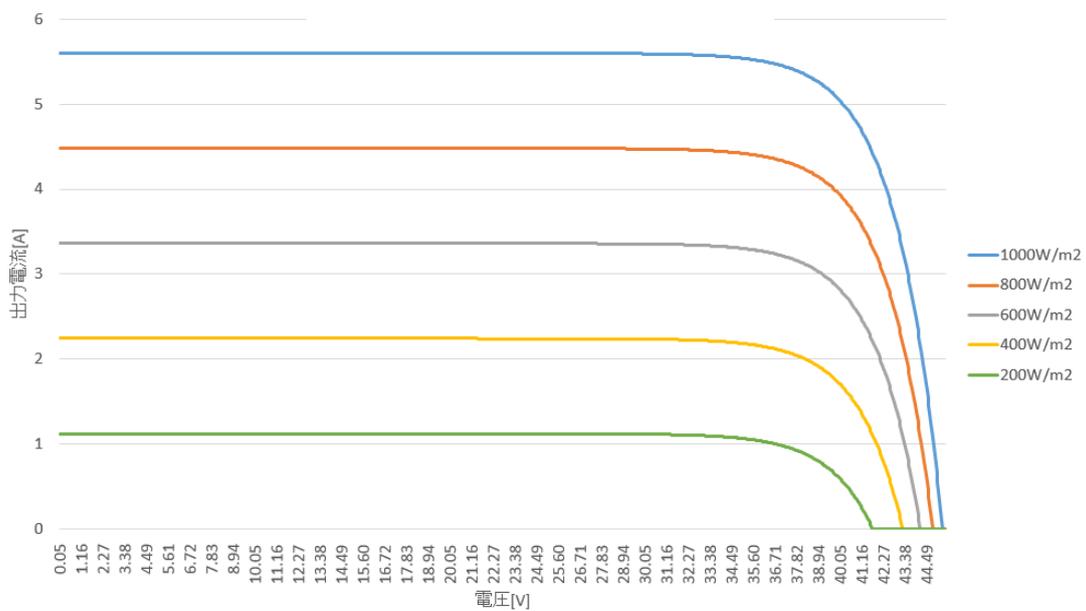
型番	CNPV-200M
セル数 [個]	72
最大電力 [W]	200
出力電圧@最大電力点 [V]	38
出力電流@最大電力点 [I]	5.25
開放電圧 [V]	45.3
短絡電流 [I]	5.62
基準放射照度 [W/m <sup>2</sup> ]	1000
基準温度 [°C]	25
バンドギャップエネルギー [eV]	1.12(シリコンの場合)
直列抵抗 [Ω]	0.0003399
並列抵抗 [Ω]	2000

### F1.3.2.1 モジュール一枚の特性

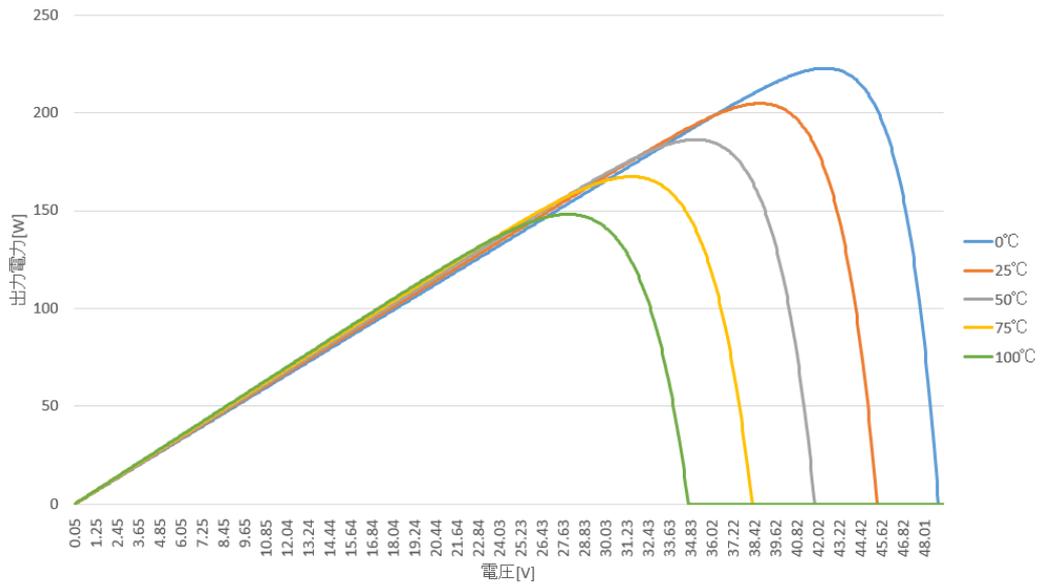
モジュール 1 枚のシミュレーションを行った。放射照度と温度を変化することにより、それぞれの特性を求めた。放射照度特性を検討する場合にモジュールの表面温度を 25 [°C] に維持する。温度特性を検討する場合に、放射照度を 1000 [W/m<sup>2</sup>] を維持する。結果を Fig.F1-8 にまとめる。



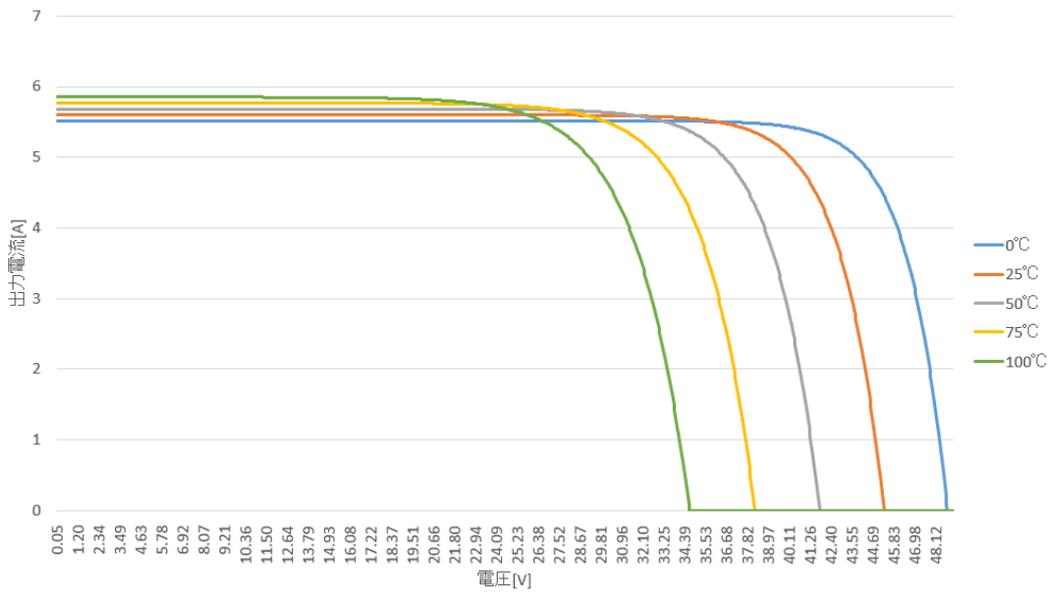
(a) 相異なる放射照度での 1 枚のモジュールの P-V カーブ



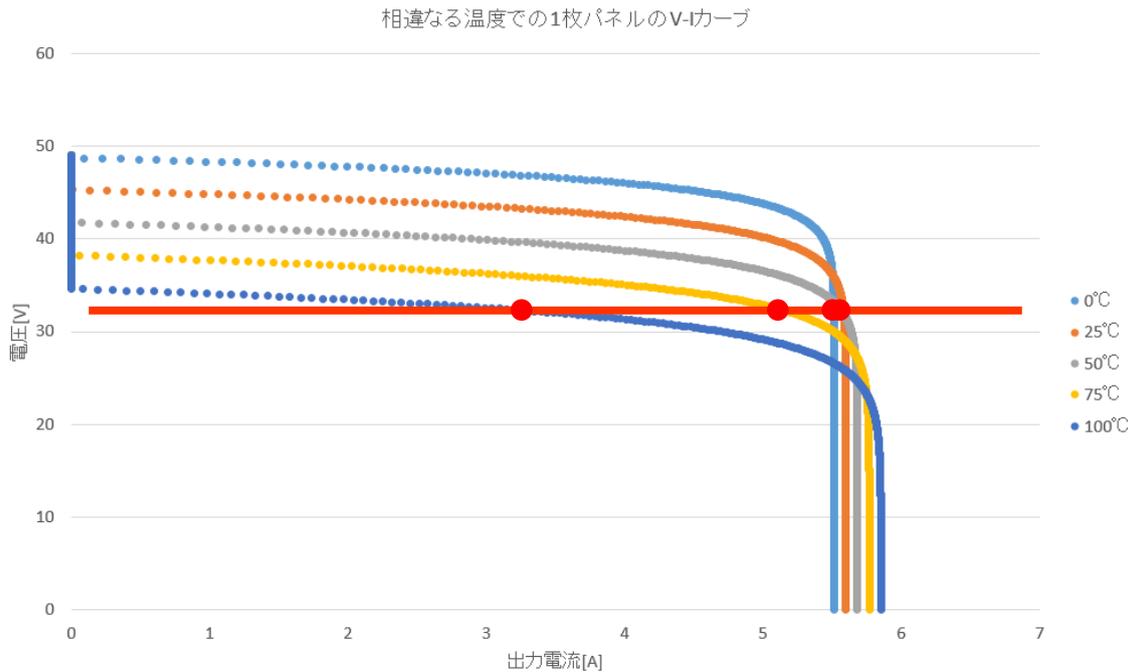
(b) 相異なる放射照度での 1 枚のモジュールの I-V カーブ



(c) 相異なるモジュール表面温度での1枚のモジュールのP-Vカーブ



(d) 相異なるモジュール表面温度での1枚のモジュールのI-Vカーブ



(e) 相異なるモジュール表面温度での1枚のモジュールのV-Iカーブ

Fig.F1-8 相異なる放射照度と温度での1枚の太陽電池モジュールの特性曲線

図より、放射照度と温度をそれぞれ変化すると、太陽電池モジュール出力への影響は違ってくる。特にその温度特性により、モジュールの表面温度が上昇し、出力が逆に低下することが判る。これはシリコン製太陽電池セルには温度が上昇すると抵抗が下がるという負温度特性を有することが影響している。抵抗とは空乏層抵抗に対応している。pn接合の電圧降下はその抵抗の両側に発生する。

太陽電池セルの場合には出力電圧は空乏層の両側の電圧で、その電圧を発生させるものは空乏層抵抗に流れるドリフト電流である。温度が一定とすると、同じ電圧を発生させるドリフト電流の量が一定である。しかし、温度が上昇すると、また同じ電圧を維持するためにより多めのドリフト電流が必要になり、外部に出力できる電流量が減るわけである。Fig.F1-8(e)に示すように、放射照度を1000 [W/m<sup>2</sup>]に維持していると、光起電力効果で発生する電流は一定になる。ここでモジュール表面温度を変えると、一つの出力量 (Fig.F1-8(e)の赤い直線) を維持するために必要なドリフト電流が多めになり、その時に出力できる電流が減った (赤い直線と各特性曲線との交差点)。

### F1.3.2.2 太陽電池アレイ回路の特性

24枚のモジュールで構築する通常の太陽電池アレイ回路は Fig.F1-9 に示される。この回路は6S4Pの回路で、6Sとは6枚のモジュールが直列接続して1

本のストリングを構成することで、4Pは4本のストリングを並列接続していることである。

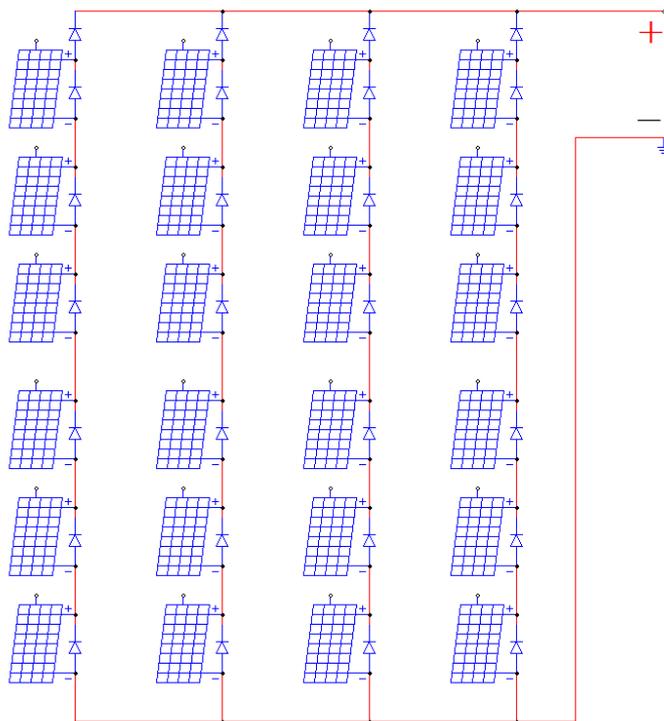
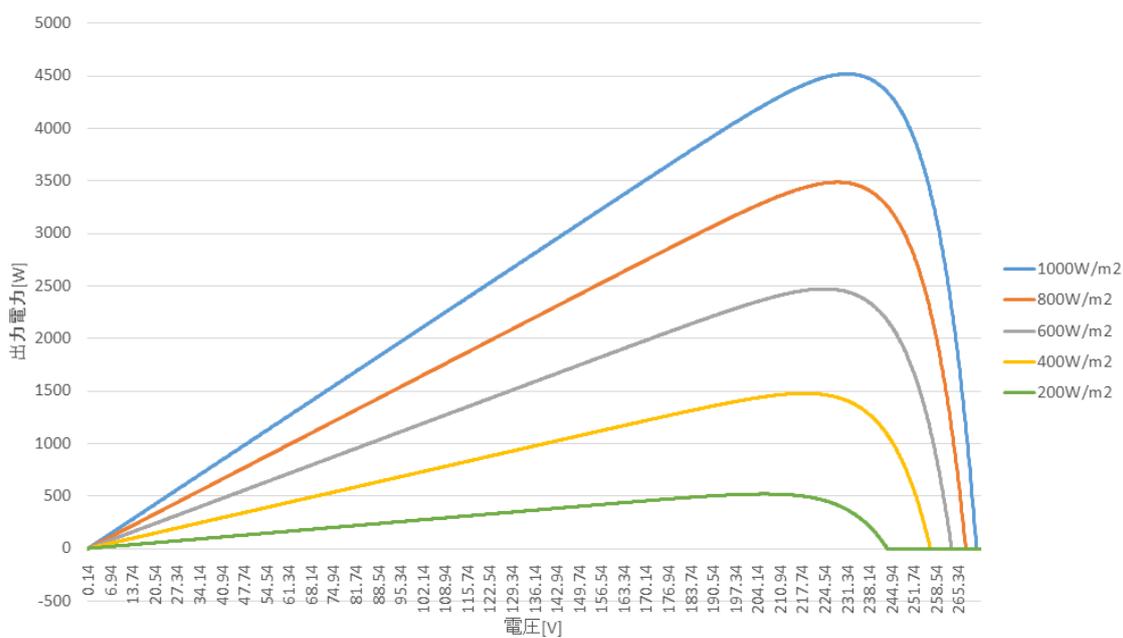
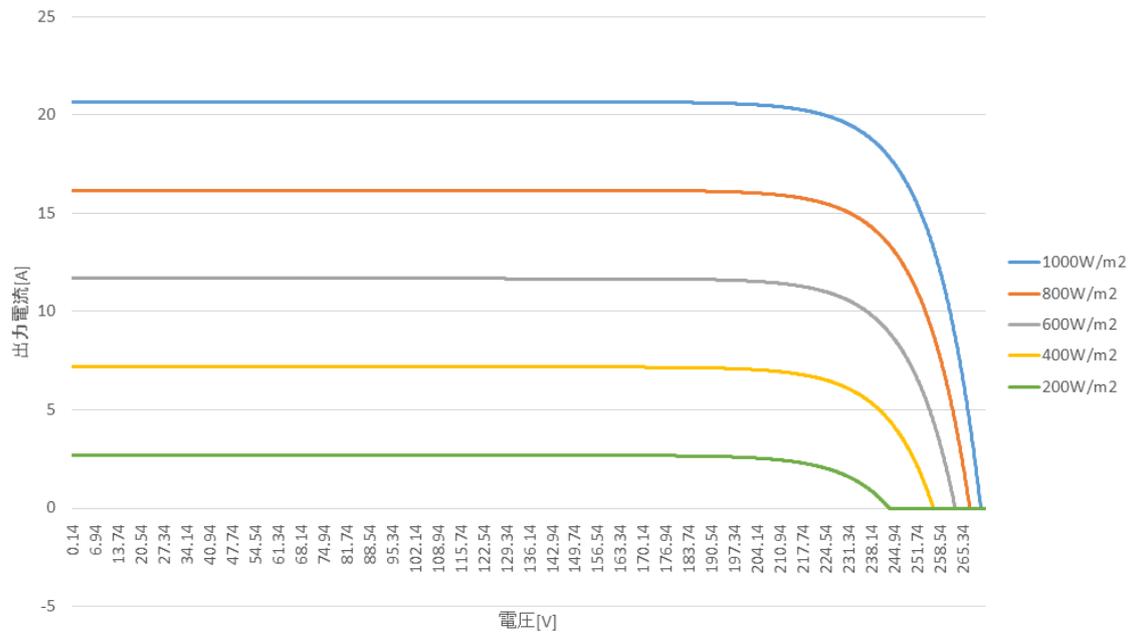


Fig.F1-9 通常アレイ回路（分断化なし）の回路図  
その特性曲線を Fig.F1-10 に示す。

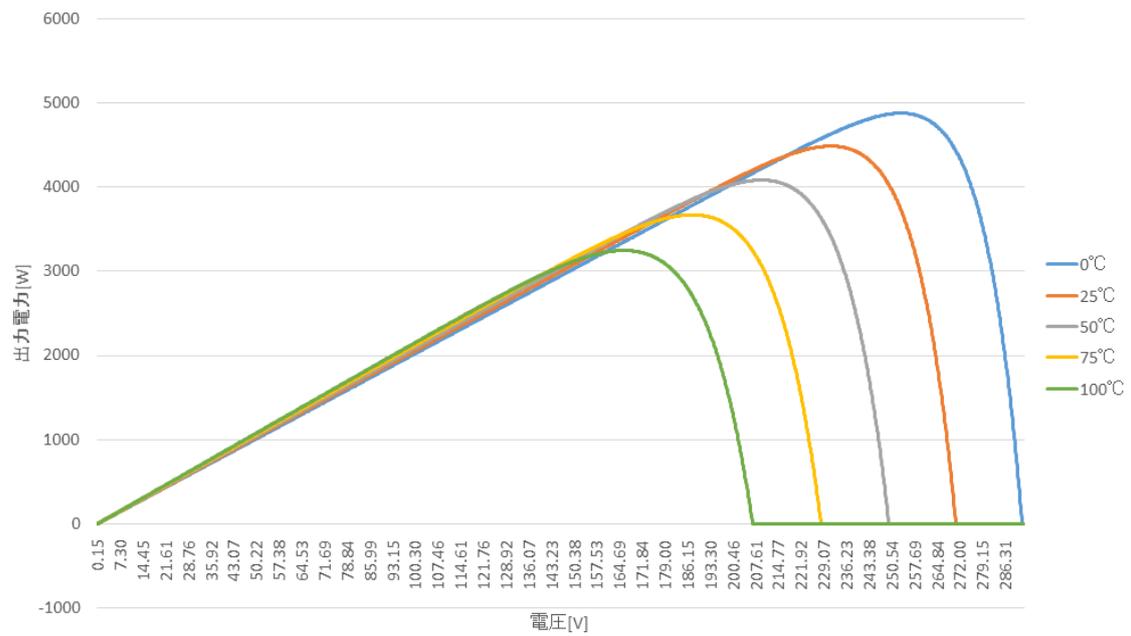


(a) 相異なる放射照度における太陽電池アレイ回路の P-V カーブ

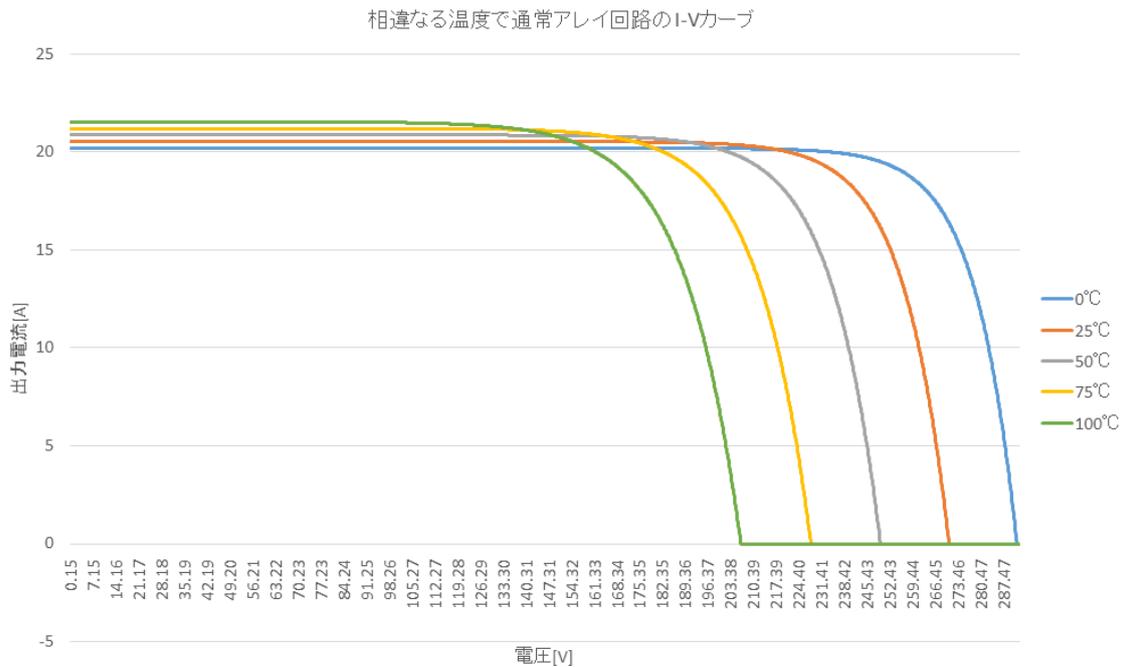


(b) 相異なる放射照度における太陽電池アレイ回路の I-V カーブ

相異なる温度で通常アレイ回路の P-V カーブ



(c) 相異なるモジュール表面温度における太陽電池アレイ回路の P-V カーブ



(d) 相異なるモジュール表面温度における太陽電池アレイ回路の I-V カーブ  
**Fig.F1-10** 相異なる放射照度と温度における通常のアレイ回路の特性曲線

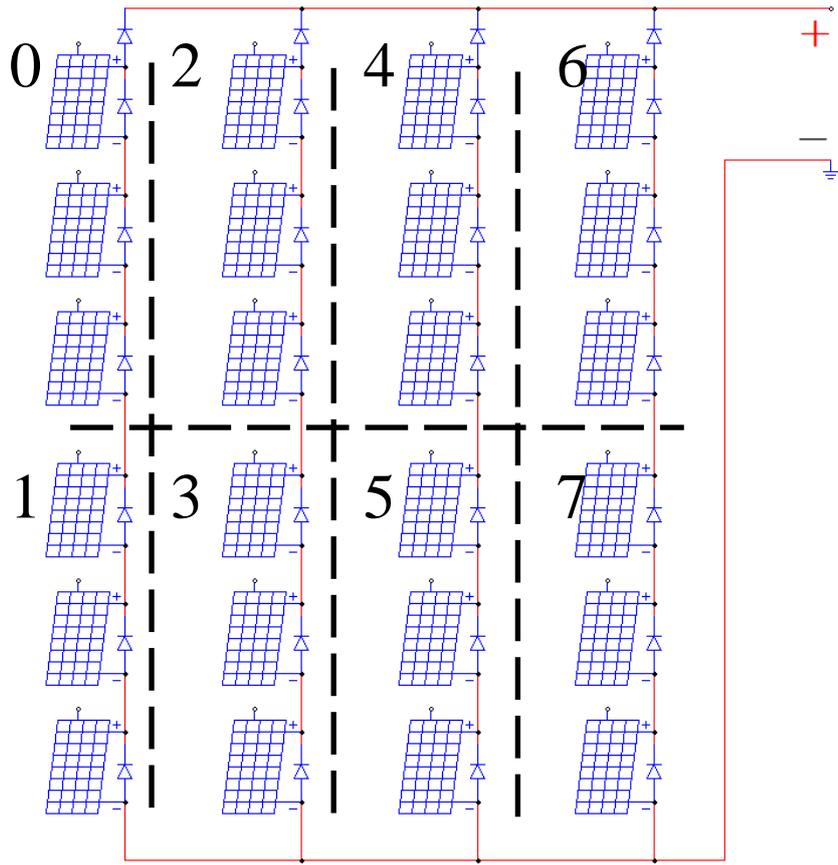
Fig.F1-10 では、Fig.F1-8 に比べて、出力電力がはるかに大きい。当然的に直並列回路なので、電圧と電流も枚数・ストリングにより増している。が、特性曲線の形状はほぼ同じことがわかった。

### F1.3.3 陰がある場合の出力特性

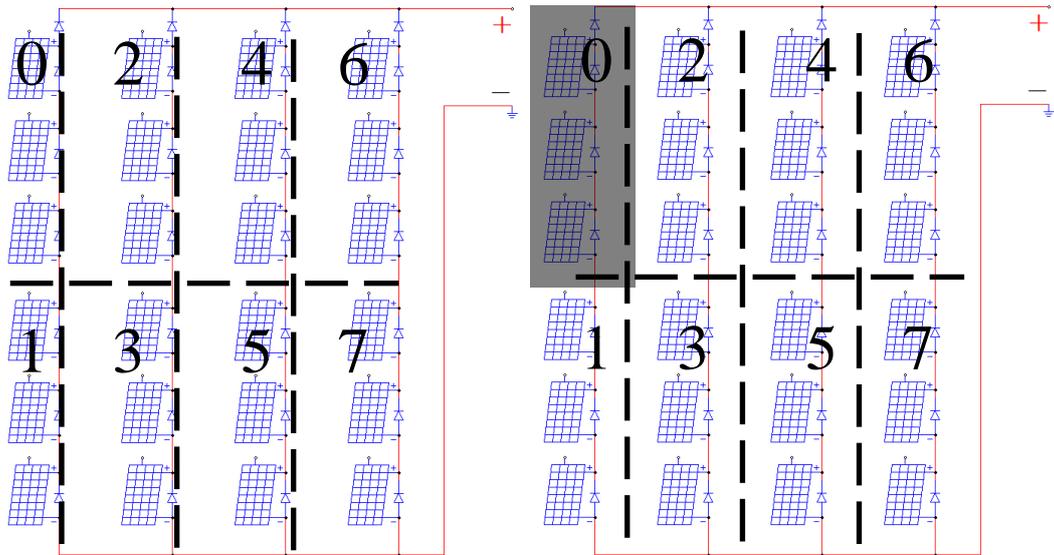
太陽光発電システムに対する陰の持つ意味は 2 つある。一つは曇り空のような雲の陰である。数値上でその陰の影響は単純に太陽電池アレイ回路に与える放射照度が下がることである。もう一つは部分陰である。定義として太陽電池アレイ回路の全部ではなく、一部だけに陰がかかったことを意味する。2 種類の陰が太陽光発電システムに与える影響のうち、部分陰の影響は甚大である。少しだけあればアレイ回路の出力電力が面積に比例以上に下がることが珍しくない。

数値的に雲の影響は単純に放射照度が減少するため、前節にてシミュレーションを行い、結果がまとめられた。本節では部分陰の影響を数値解析する。

シミュレーション用の太陽電池アレイ回路は前節と同じく 24 枚モジュールのものである。回路図は Fig.F1-11(a) に示されている。その中に位置番号というものも付けている。0~7 の位置番号は各 3 枚のモジュールを表している。部分陰の影響は Fig.F1-11(b)~(f)に示す通りに、その位置番号が代表する 3 枚のモジュールの放射照度を元の 15 [%]まで下げることである。部分陰の位置は「陰なし-0-01-02-03」の順序でシミュレーションを行う。



(a) 太陽電池アレイ回路の回路図・位置番号



(b) 部分陰なし

(c) 一位陰 0

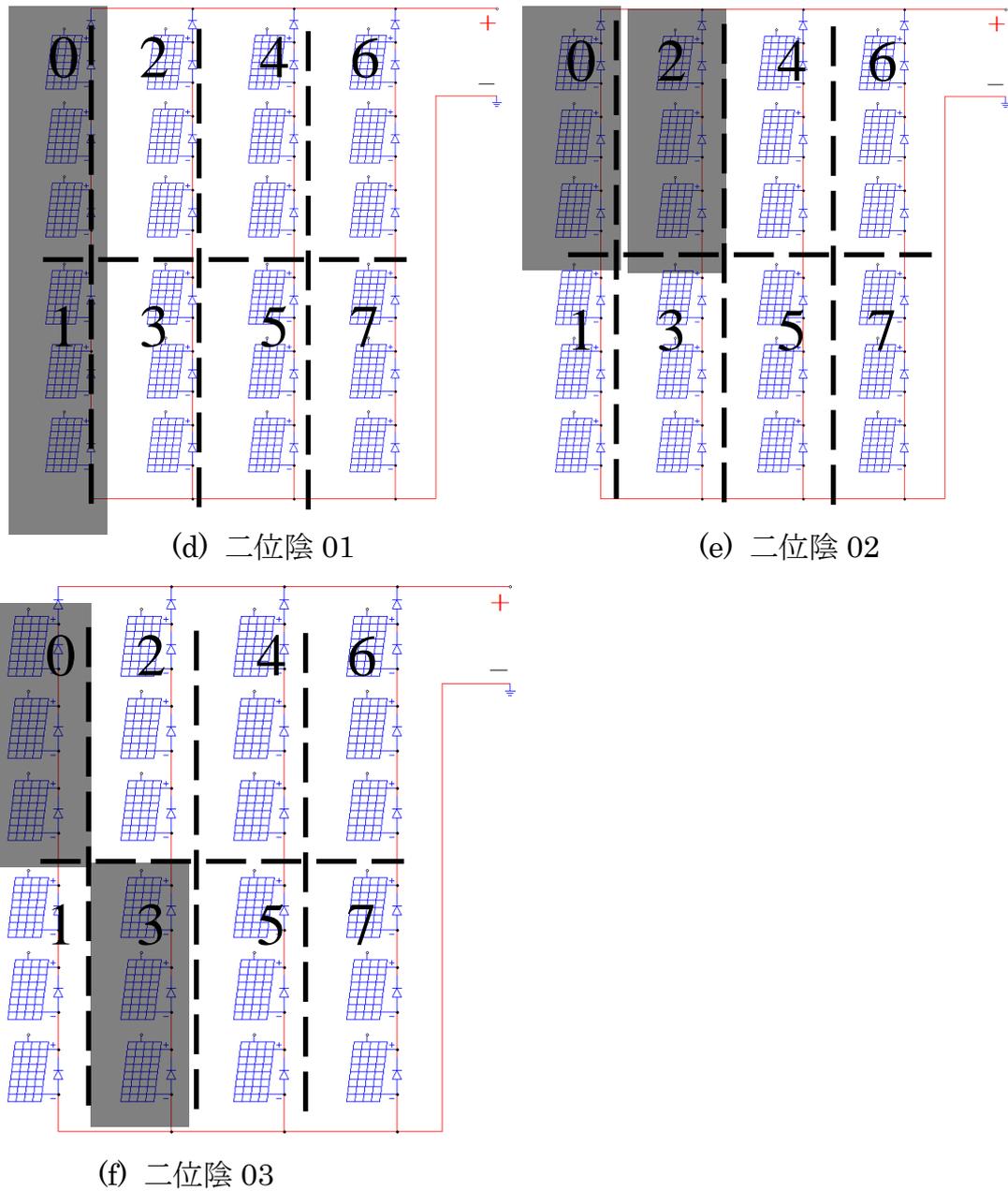
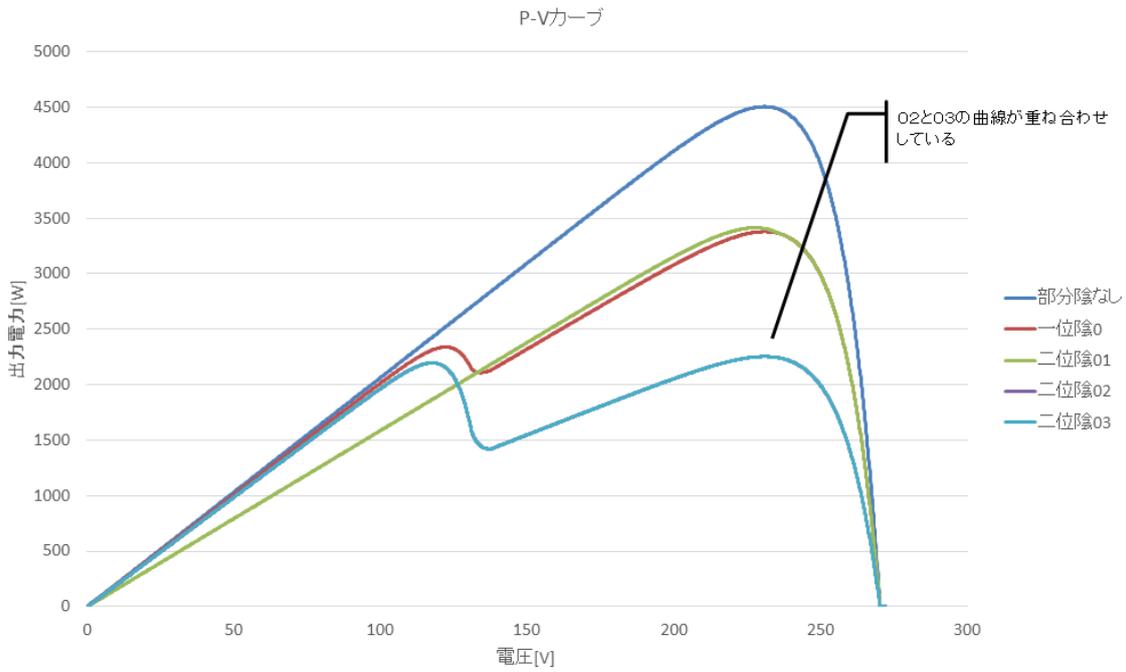


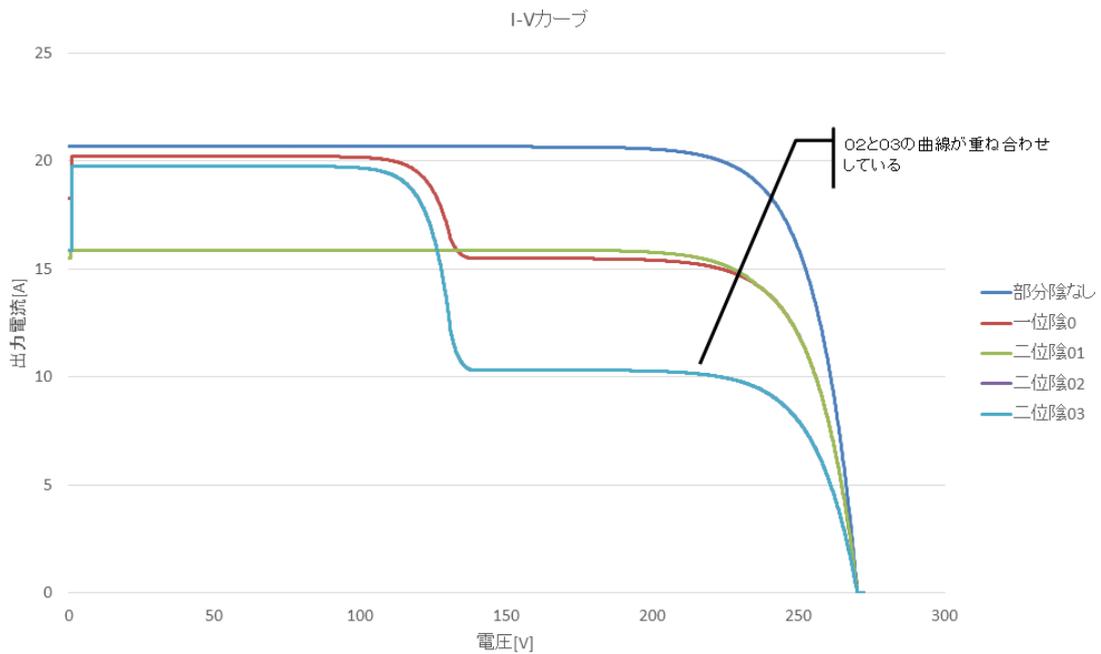
Fig.F1-11 太陽電池アレイ回路の回路図・位置番号及び部分陰の発生手法

シミュレーションの条件：放射照度を  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ・モジュールの表面温度を  $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ である。陰がかかる場所の放射照度は元の  $15 \text{ [%]}$  ( $150 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ) までになる。

シミュレーションの結果は Fig.F1-12 に示す。



(a) P-V カーブ



(b) I-V カーブ

Fig.F1-12 「陰なし-0-01-02-03」の陰での太陽電池アレイ回路特性

Fig.F1-12 より、部分陰特有な多峰性のある P-V カーブが生じた。ついでに位置 2 と 3 は同じストリングなので、陰が 02 と 03 にかかるでも同じ結果に至った。Table.F1-2 のデータもこの結果を示した。

Table.F1-2(a) 通常アレイ回路（分断なし）での最大電力点をまとめた

最大電力点 [W]	部分陰なし	一位陰 0	二位陰 01 (Type III)	二位陰 02 (Type II)	二位陰 03 (Type I)
分断化なし	4505.34	3379	3413.42	2252.67	2252.67

Table.F1-2(b) 通常アレイ回路（分断なし）での最大電力点の電圧をまとめた

最大電力点での電圧 [V]	部分陰なし	一位陰 0	二位陰 01 (Type III)	二位陰 02 (Type II)	二位陰 03 (Type I)
分断化なし	230.79	230.79	227.66	230.79	230.79

### F1.3.4 多峰性の成因

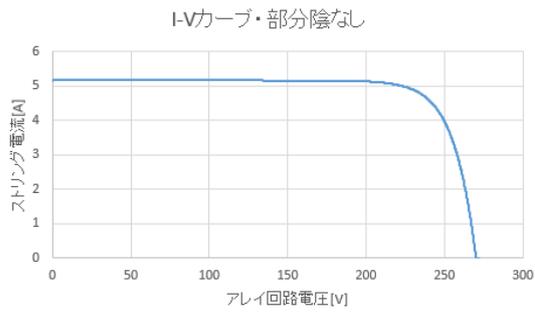
F1.3.3 節では太陽電池アレイ回路が部分陰にかかる時の電気特性をまとめた。中に二位陰 02・03 では多峰性がある曲線を確認した。その発生原因を解析する。

Fig.F1-12(b)の I-V カーブより、二位陰 02・03 のアレイ回路出力電流は電圧の上昇に沿って、約 140 [V]では突然低下した異変が発生した。それはストリングにある逆流防止ダイオードの導通→遮断のことである。

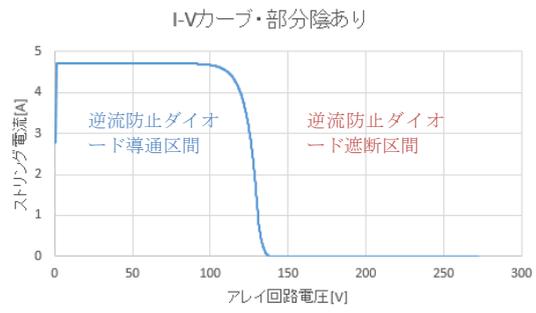
アレイ回路には複数本のストリングが並列接続している。重ね合わせの理により、並列接続の電源対負荷の特性は単独で解析できるので、部分陰がなしのストリング対負荷とする I-V カーブは Fig.F1-13(a)に示すようになるものの、部分陰があるストリング対負荷とする I-V カーブは Fig.F1-13(b)のようなものである。ただし、例とする一本のストリングの最大電力点電流は 5 [A]程度である。(a)と(b)を二本ずつ（総計 4 本のストリング）を並列接続する。計算上単純に電流値を足し算することである。すると、Fig.F1-13(c)に示す階段性を有する I-V カーブになる。P-V カーブは Fig.F1-13(d)に示される通りに多峰性を有する曲線になる。

逆流防止ダイオードの導通は部分陰ありのストリングが発生する電圧とアレイ回路全体の電圧の差で決まる。ダイオードは一方通行の特性を有し、その特性はアノードとカソードの電位差で決まる。ストリングの+極は逆流防止ダイオードのアノードと、またアレイ回路はそのダイオードのカソードと繋がる。よって、アレイ回路の負荷調整（MPPT 動作）でアレイ回路の電圧が部分陰にかかるストリングの出力電圧より高い場合に、そのダイオードは導通できず、負荷への出力全部失われる。

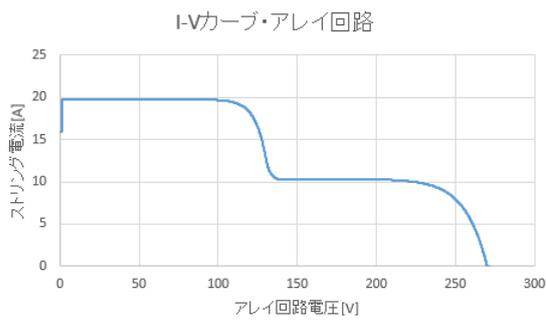
このとき、そのストリングに発生する電流はどこに行くかが疑問点になる。Fig.F1-4 の数値モデルを参考すれば、その電流は全て数値モデルの等価ダイオードに流れ、ドリフト電流になる。同時に大量のジュール熱が発生し、「ホットスポット現象」を引き起こす。



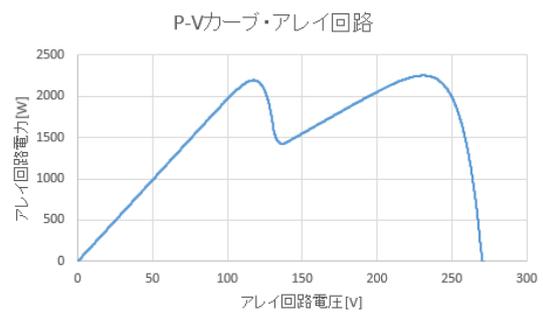
(a)部分陰なしの I-V カーブ



(b)部分陰ありの I-V カーブ



(c)部分陰なしの I-V カーブ



(d)部分陰ありの I-V カーブ

Fig.F1-13 多峰性の原因究明

長時間ホットスポット現象が持続すると、その熱で太陽電池モジュールを損壊するので、太陽光発電システムでは部分陰対策を取らないと行けないと考える。

## F1.4 DC-DC コンバーター回路とその数値モデル

背景で述べたように、太陽光発電システムにはMPPTアルゴリズムを実行するDC-DCコンバーターが含まれている。システムの種類よりそのコンバーターの選択が相異なるので、各コンバーターの特性を説明する。

### F1.4.1 昇圧チョッパ回路

昇圧チョッパ回路とは直流電圧を高める回路である。以下昇圧回路と呼ぶ

従来の昇圧回路は Fig.F1-14 に示される。出力電圧  $V_{out}$  は入力電圧  $V_{in}$  より倍増することができる。

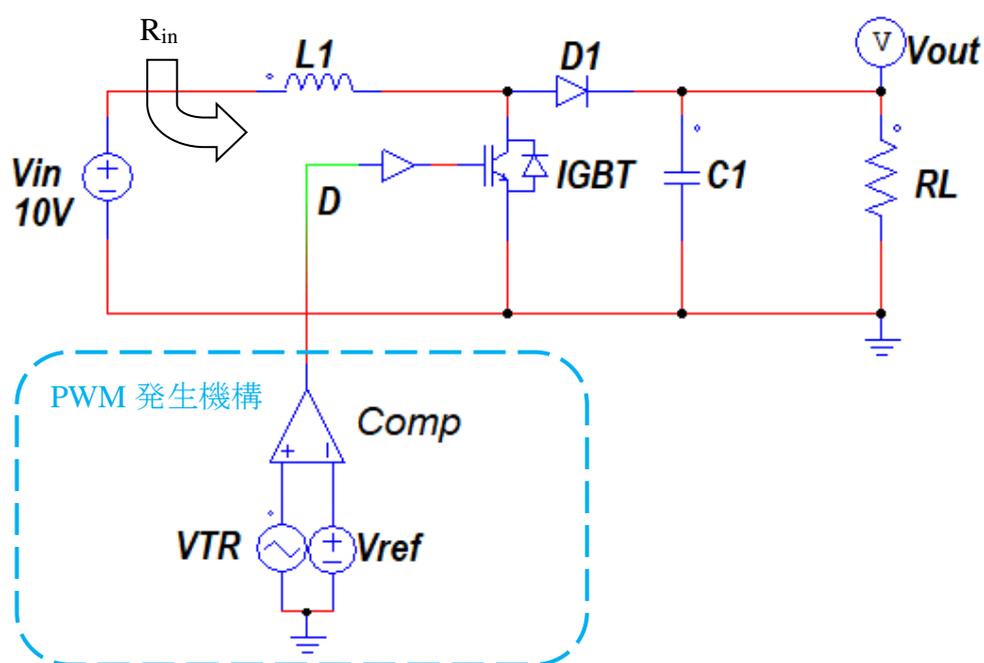


Fig.F1-14 開ループ昇圧回路

この回路は入力電圧源  $V_{in}$ 、エネルギーを貯蔵するリアクター  $L_1$ 、スイッチとする IGBT、逆流防止ダイオード  $D_1$ 、平滑コンデンサ  $C_1$ 、負荷の  $R_L$ 、PWM 発生機構の三角波電源  $V_{TR}$ ・基準電源  $V_{ref}$  と比較器  $Comp$  で構成する。

その原理はスイッチにより、一周期内の一部の時間帯に電源からのエネルギーをリアクターに貯め、他の時間帯に電源とリアクターを直列接続し負荷に供給する。結果として負荷にかかる平均的な電圧が昇圧される。そして昇圧の倍率はリアクターの充電と放電の時間長の比  $D$  (PWM 波のデューティ比) により調整できる。 $V_{TR}$  の三角波周波数はスイッチングの周波数であり、 $V_{ref}$  の直流

電圧と三角波の電圧を比較し、方形波を発生する。Vref が変化すると方形波のデューティ比 D が増減できる。

出力電圧  $V_{out}$  とデューティ比  $D$  との諸関係は以下の式にまとめられる：

$$\text{電圧の関係} : V_{out} = V_{in} / (1 - D) \dots\dots\dots (F1-7)$$

$$\text{昇圧率} : k = 1 / (1 - D) \dots\dots\dots (F1-8)$$

$$\text{入力抵抗} : \lim_{D \rightarrow 1} R_{in} = 0 \dots\dots\dots (F1-9)$$

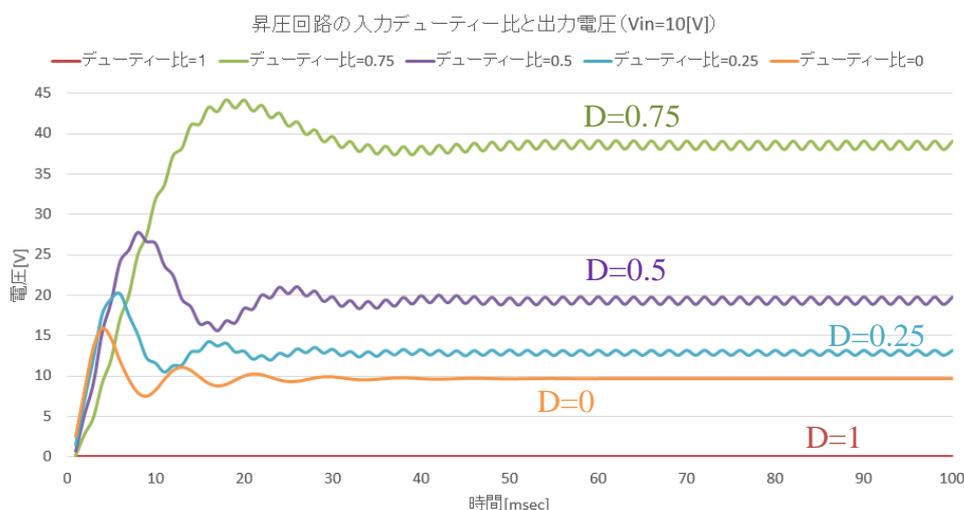
$$\text{入力抵抗} : \lim_{D \rightarrow 0} R_{in} = R_L \dots\dots\dots (F1-10)$$

$$\text{入力抵抗の変化範囲} : 0 < D < 1 \Rightarrow 0 < R_{in} < R_L \dots\dots\dots (F1-11)$$

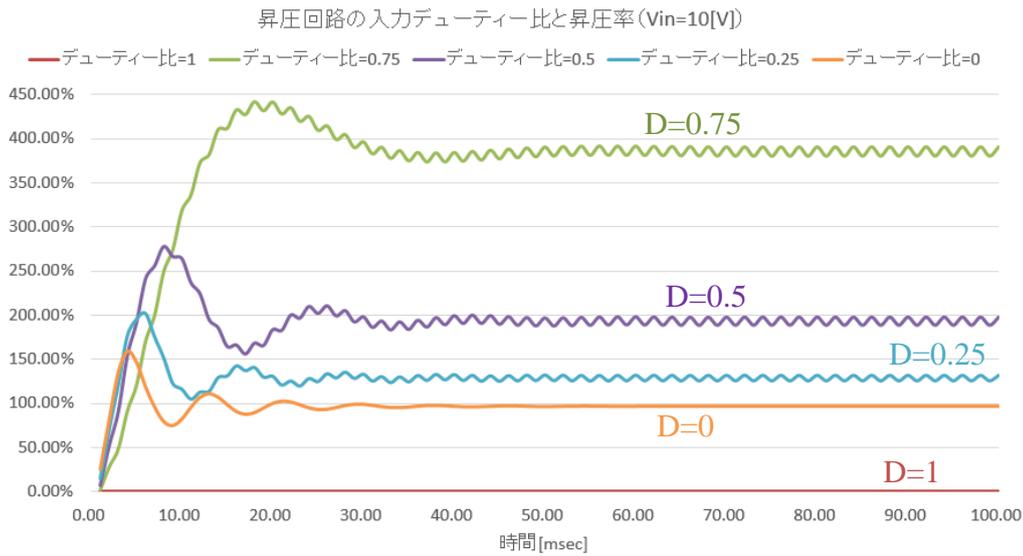
昇圧回路は単純に直流電圧を倍増させるだけではなく、入力電源から見る入力抵抗の調整もできる。式(F1-11)より、デューティ比 D の変化範囲は 0~1 である。昇圧回路にとって D=1 はスイッチが常に導通し、その際に  $R_{in}=0 [\Omega]$  (短絡される) である。D=0 の場合にスイッチが開放され、その時の  $R_{in}=R_L$  である。それは太陽電池アレイ回路に対する重要な機能である。太陽電池は電流源であるので、負荷抵抗値の変化により出力特性が変わるわけである。

なお、式(F1-7)より、昇圧回路の理論的な昇圧率が高いと見られるが、実際に安定的に、リップル電圧が抑えられる動作するためには、昇圧率を 2 倍程度に制限したほうが良いと言われる。PSIM でシミュレーションした結果を Fig.F1-15 に示す。

入力電圧は 10 [V] である。



(a) 入力デューティ比と出力電圧



(b) 入力デューティ比と昇圧率

Fig.F1-15 昇圧チョッパ回路の昇圧率と PWM 波デューティ比の関係

Fig.F1-15 より、デューティ比が 1 にすると、回路の出力が失われた。その原因はスイッチの IGBT がいつも導通して、回路が充電の状態（リアクターにて電源が短絡されている）に停滞しているためである。

デューティ比が 0.75 の時、昇圧率は高くなったが、出力電圧の波形に含まれるリップル電圧も高くなった。その原因は充電の時間は放電の時間より長く、電源とインダクタと直列接続の時間が短く、対負荷の出力が安定できなかったためである。

デューティ比が 0.5 以下の場合には昇圧率が 200 [%]以下になり、放電時間は充電時間より少々長くなった。

デューティ比が 0 にすると、スイッチが開放する状態になって、充電動作はなくなった。この場合に電源が普通の電源として負荷に電力を供給する。そして、逆流防止ダイオードの電圧降下の効果が存在するので、負荷に受けられる電圧が少々低下し、昇圧率も 100 [%]弱になった。

以上の動作分析より、昇圧回路の正常デューティ比は 0~0.5 の範囲に設定した方が良い。

伝達関数をまとめる。Fig.F1-14 より、昇圧回路の入出力は二つの入力（入力電圧  $V_{in}$  とデューティ比  $D$ ）と一つの出力（ $V_{out}$ ）である。

計算すると、昇圧回路の伝達関数は以下のようになる。

$$G(s) = \frac{(1-D)}{s^2 L_1 C_1 + s \frac{L_1}{R_L} + (1+D)^2} \dots\dots\dots (F1-12)$$

これは二次遅れ系の伝達関数である。

### F1.4.2 降圧チョップパ回路

降圧チョップパ回路とは直流電圧を下げる回路である。以下降圧回路と呼ぶ。

従来の降圧回路は Fig.F1-16 に示される。出力電圧  $V_{out}$  は入力電圧  $V_{in}$  より減少することができる。

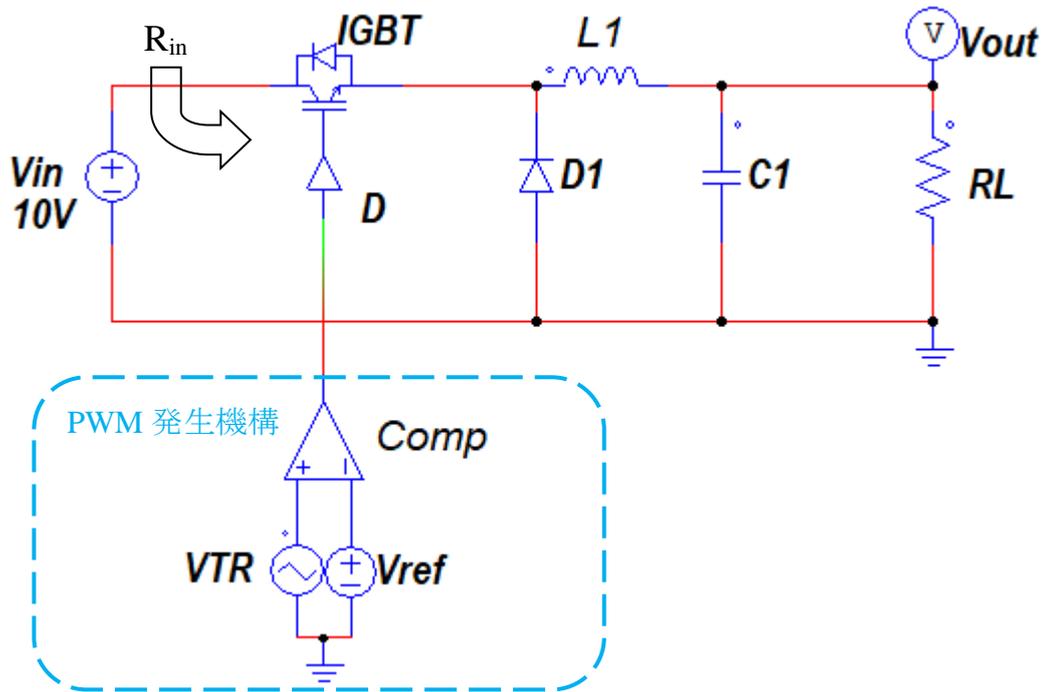


Fig.F1-16 開ループ降圧回路

この回路は入力電圧源  $V_{in}$ 、エネルギーを貯蔵するリアクター  $L1$ 、スイッチとする IGBT、逆流防止ダイオード  $D1$ 、平滑コンデンサ  $C1$ 、負荷の  $R_L$ 、PWM 発生機構の三角波電源  $V_{TR}$ ・基準電源  $V_{ref}$  と比較器  $Comp$  で構成する。構造的に昇圧回路との違いは IGBT・ $D1$  と  $L1$  の位置だけである。

その回路の原理もスイッチのスイッチングによって、一周内に一部の時間帯に電源からのエネルギーをリアクターに貯め、同時に負荷にエネルギーを供給する。他の時間帯にスイッチで電源を切り、リアクターに貯めたエネルギーを放出し負荷に供給する。すると、負荷にかかる平均的な電圧が減少できる。そして降圧の比率は時間長の比  $D$  (PWM 波のデューティ比) により調整できる。 $V_{TR}$  の三角波周波数はスイッチングの周波数であり、 $V_{ref}$  の直流電圧と三角波の電圧を比較し、方形波を発生する。 $V_{ref}$  が変化すると方形波のデューティ比  $D$  が増減できる。

出力電圧  $V_{out}$  とデューティ比  $D$  との諸関係は以下の式にまとめられる：

$$\text{電圧の関係} : V_{out} = V_{in} \times D \dots\dots\dots (F1-13)$$

$$\text{降圧率} : k = D \dots\dots\dots (F1-14)$$

$$\text{入力抵抗} : \lim_{D \rightarrow 1} R_{in} = R_L \dots\dots\dots (F1-15)$$

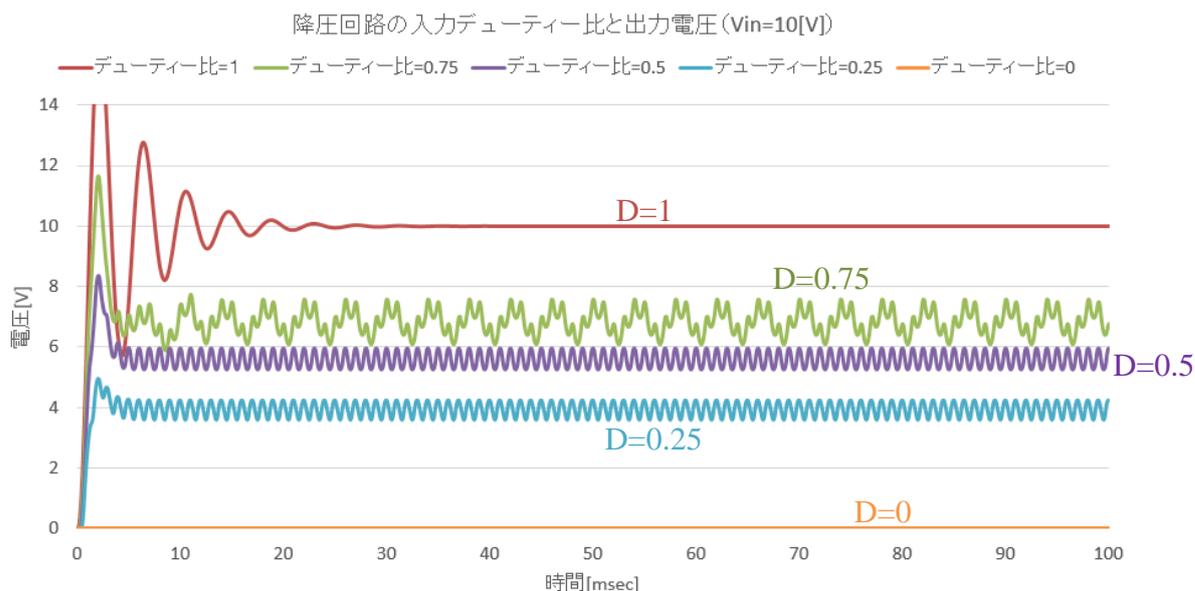
$$\text{入力抵抗} : \lim_{D \rightarrow 0} R_{in} = \infty \dots\dots\dots (F1-16)$$

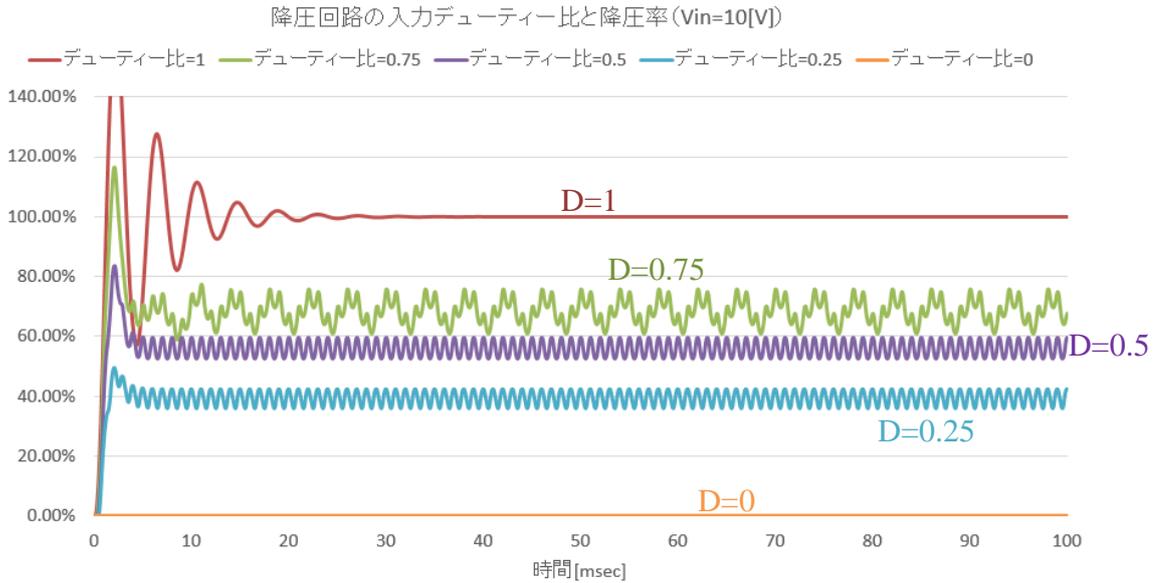
$$\text{入力抵抗の変化範囲} : 0 < D < 1 \Rightarrow R_L < R_{in} < \infty \dots\dots\dots (F1-17)$$

いわゆる降圧回路は単純に直流電圧を減少させることではなく、入力電源から見る入力抵抗の調整もできる。式(F1-17)より、デューティ比 D の変化範囲は 0~1 である。降圧回路にとって D=1 はスイッチが常に導通し、その際に  $R_{in} = R_L$  である。D=1 の場合にスイッチが開放し、その時の  $R_{in}$  は  $\infty$  [ $\Omega$ ] (開放される) である。それは太陽電池アレイ回路に対する重要な機能である。太陽電池は電流源であるので、負荷抵抗値の変化より出力特性が変わるわけである。

降圧回路の特性をシミュレーションで検証した。この結果を Fig.F1-17 に示す。

入力電圧は 10 [V] である。





(b) 入力デューティ比と降圧率

Fig.F1-17 降圧チョップパ回路の降圧率と PWM 波デューティ比の関係

Fig.F1-17 より、デューティ比が 1 にすると、回路が単純に導通だけであった。電源電圧の 10 [V]を直接出力した。

デューティ比が 0.75 の時、降圧率は 75%程度になった。出力電圧の波形に含まれるリップル電圧も高くなった。その原因は平滑コンデンサの容量が足りなかったことである。増やせば安定になるはずである。

デューティ比が 0.5 以下の場合には降圧率はデューティ比と同じく、放電時間は充電時間より少々長くなった。

デューティ比が 0 にすると、スイッチがいつも開放する状態になって、回路が動かなくなった。

伝達関数をまとめる。Fig.F1-16 より、降圧回路の入出力も二つの入力（入力電圧  $V_{in}$  とデューティ比  $D$ ）と一つの出力（ $V_{out}$ ）である。

計算すると、回路の伝達関数は以下ようになる。

$$G(s) = \frac{D}{s^2 L_1 C_1 + s \frac{L_1}{R_L} + 1} \dots\dots\dots (F1-18)$$

これも二次遅れ系の伝達関数である。

## 付録 第2章

# 数値シミュレーション及び 実験の精度向上に対する検討

## F2.1 実際の天気データを用いるシミュレーション 及び太陽電池モジュールの表面温度の計算法

以上述べた諸検討においては放射照度が常に固定されていた。ところが、実際の太陽光発電システムが受ける太陽光の強度が均一になることはありえない。日本の気象庁は毎年日本全土の気象データを配布しているので、本節にはそのデータを利用し、シミュレーションを行う。

### F2.1.1 気象データの利用法

利用している天気データは気象庁からもらった 2010 年の奈良地方気象台の全年データである。ここで利用したい天気データは毎月の 5 日・15 日・25 日の気温・10 分間平均風速・全天日射量である。気象庁のデータから直接入手したものは Table.F2-1 に示す。

Table.F2-1 気象庁のデータのコピー (一部)

番号	時	分	20100105			20100115			20100125		
			気温 (0.1℃)	平均風速 (10分移動平均) (0.1m/s)	全天日射量 (0.01KJ/m <sup>2</sup> )	気温	平均風速(10分移動平均)	全天日射量	気温	平均風速(10分移動平均)	全天日射量
720	12	0	55	45	1123	55	26	3525	33	17	535
721	12	1	56	44	1088	57	27	3529	32	17	540
722	12	2	56	46	1509	59	28	3464	31	17	539
723	12	3	58	44	2691	59	29	3550	31	17	521
724	12	4	61	47	3497	63	30	3580	31	18	498
725	12	5	63	46	3496	62	29	3595	31	18	464
726	12	6	66	44	3637	60	28	3631	31	18	415
727	12	7	71	40	3616	61	29	3596	30	19	380
728	12	8	72	36	3730	59	30	3555	30	19	363
729	12	9	69	34	3809	59	29	2688	30	19	354

Table.F2-1 からわかるように、各データの単位とデータが読みにくいいため、換算する必要がある。換算したデータを Table.F2-2 にまとめる。

Table.F2-2 天気データの整理 (一部)

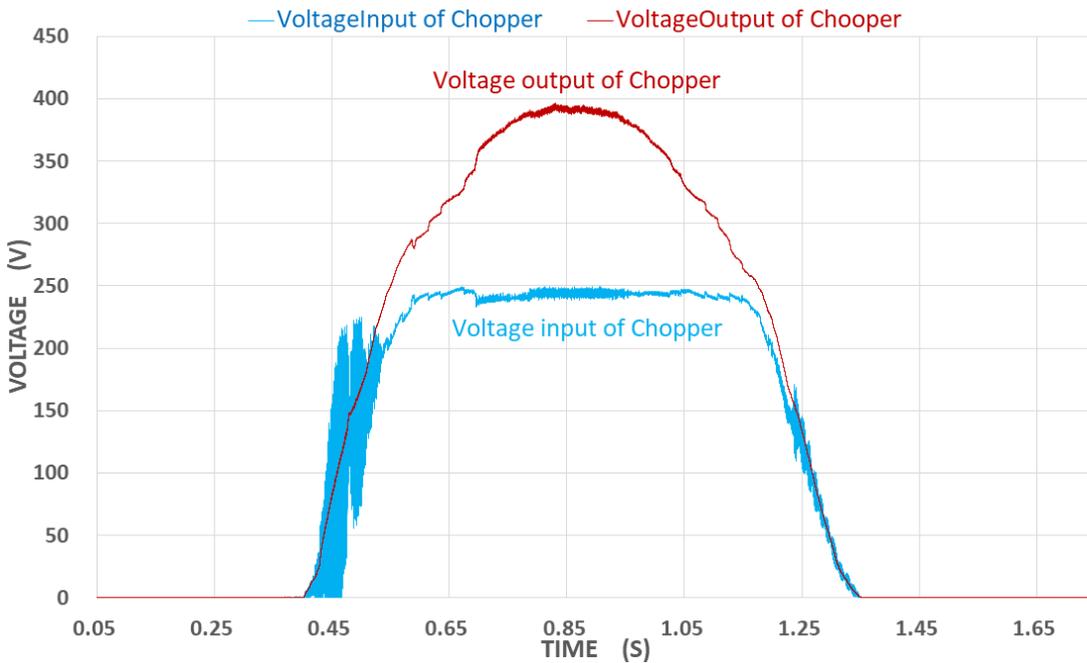
番号	時	分	20100105			20100115			20100125		
			気温 (1℃)	風速 (1m/s)	全天放射照度 (W/m <sup>2</sup> )	気温	風速	全天日射量	気温	風速	全天放射照度
720	12	0	5.50	4.50	187.17	5.50	2.60	587.50	3.30	1.70	89.17
721	12	1	5.60	4.40	181.33	5.70	2.70	588.17	3.20	1.70	90.00
722	12	2	5.60	4.60	251.50	5.90	2.80	577.33	3.10	1.70	89.83
723	12	3	5.80	4.40	448.50	5.90	2.90	591.67	3.10	1.70	86.83
724	12	4	6.10	4.70	582.83	6.30	3.00	596.67	3.10	1.80	83.00
725	12	5	6.30	4.60	582.67	6.20	2.90	599.17	3.10	1.80	77.33
726	12	6	6.60	4.40	606.17	6.00	2.80	605.17	3.10	1.80	69.17

727	12	7	7.10	4.00	602.67	6.10	2.90	599.33	3.00	1.90	63.33
728	12	8	7.20	3.60	621.67	5.90	3.00	592.50	3.00	1.90	60.50
729	12	9	6.90	3.40	634.83	5.90	2.90	448.00	3.00	1.90	59.00

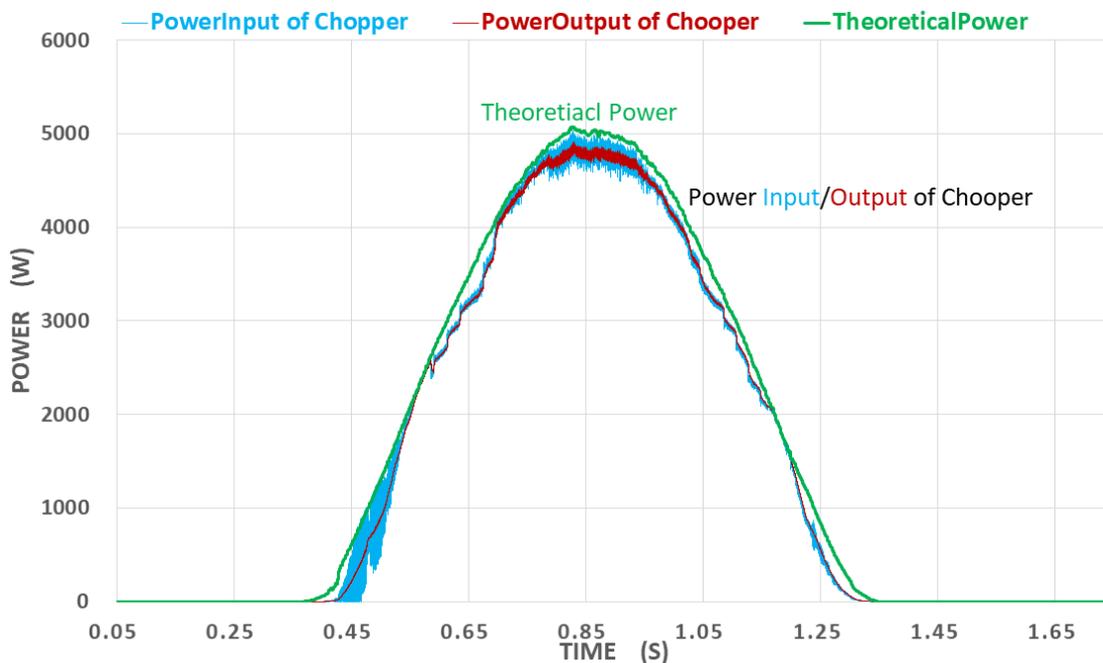
換算した Table.F2-2 のデータが読みやすくなった。そして、なぜ全天放射照度だけではなく、気温と風速も含めているかを後節に述べる。

#### F2.1.1.1 太陽電池モジュール温度の影響を無視するシミュレーション

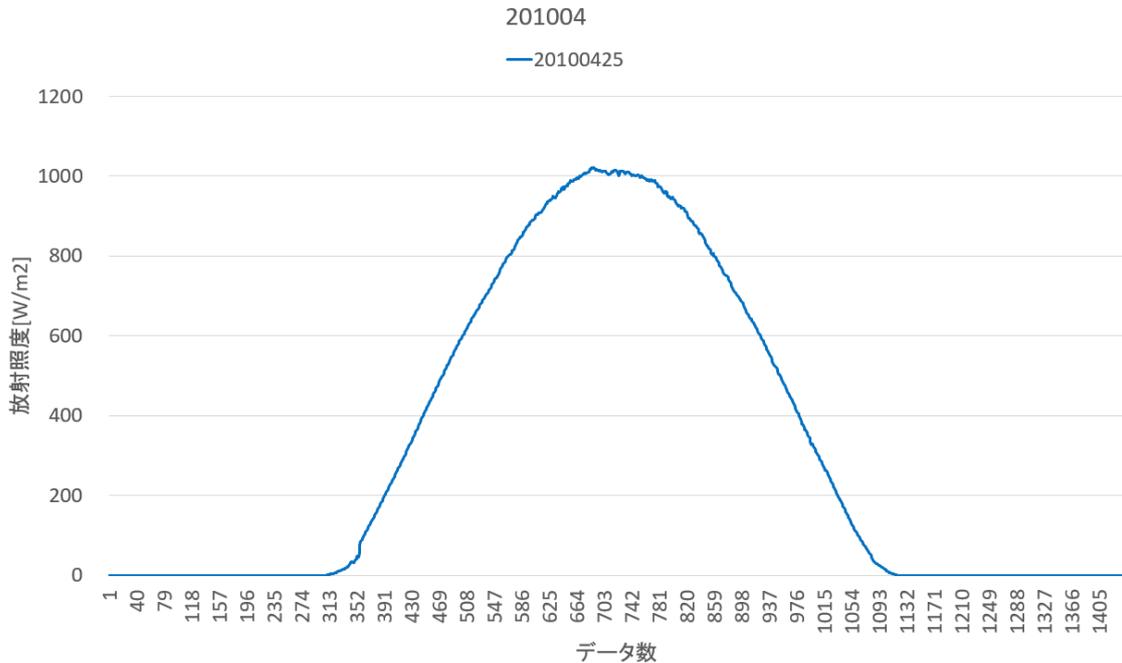
気温と風速を無視し、全天放射照度のみをシミュレーションに導入すると、一日中のシステムの出力の様子が Fig.F2-1 のように得られる。



(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 全天放射照度

Fig.F2-1 2010年4月25日の出力の様子(モジュール温度:25°C)

シミュレーションの時間長さは1.74秒である。気象庁の天気データは1分間を単位として採集したので一日24時間のデータ数は1440個である。一回のシミュレーションの刻みは0.000005秒で、1分間のデータを240回シミュレーションすると、計算上は1.74秒のシミュレーション時間長で一日の時間をシミュレーションすることができる。

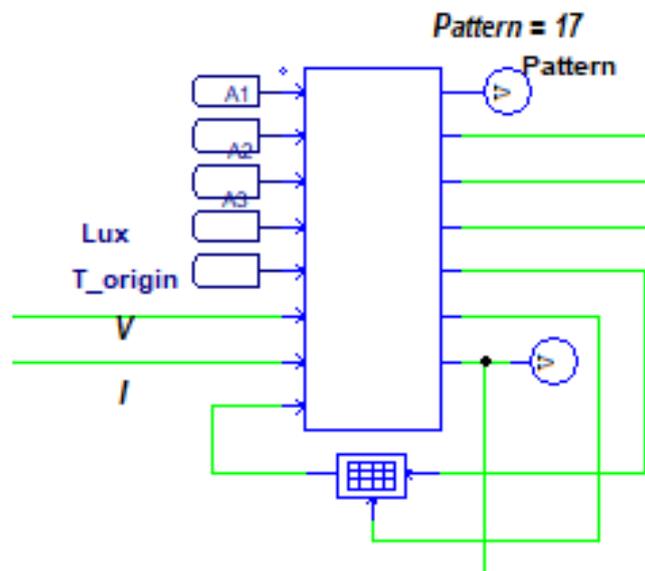


Fig.F2-2 C-block 外部ファイル読み込む方法

データは C-block 内蔵式ではなく、Fig.F2-2 のような外部ファイルを読み込む方式とする。これによって、データを簡単に編集できるようになったため、システムの適応性が向上できた。

### F2.1.1.2 太陽電池モジュール表面温度の計算

実際のシミュレーションで気温あるいは太陽電池モジュールの表面温度を無視し計算した結果が正しくないを考える。その原因は太陽電池モジュールの表面温度が出力効率に影響するからである。省略すると出力や発電量の統計数値が不正確となる。

よって、天気データより放射照度・気温・風速と季節を変数として得て、熱収支の計算より太陽電池モジュールの表面温度を計算することになる。

熱収支の概念は Fig.F2-3 に示されている。

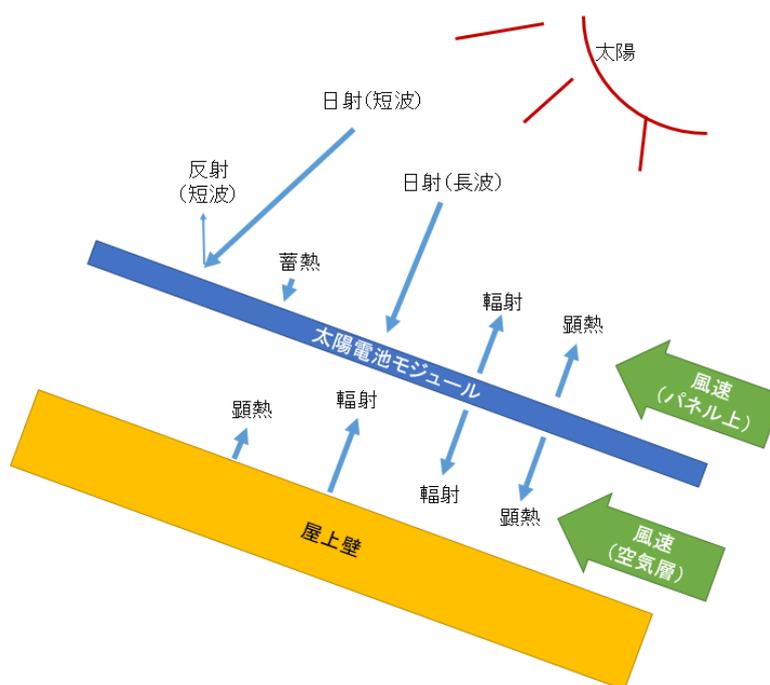


Fig.F2-3 太陽熱収支の概念[F2-1]

Fig.F2-3 より、熱収支方程式をまとめると、以下の式が得られた。

$$\text{顕熱フラックス [W/m}^2\text{]} : H = h \times (T_s - T_a) \dots\dots\dots (7-1)$$

$$\text{総括熱伝導係数 [W/m}^2\text{/}^\circ\text{C]} : h = 4.3V + 1.6 \dots\dots\dots (7-2)$$

$$\text{総括風速 [m/s]} : V = V_s + V_b = V_s + 0.4037V_s + 0.3954 = 1.4037V_s + 0.3954 \dots\dots\dots (7-3)$$

$$\text{太陽光からの吸収熱 [W/m}^2\text{]} : H = L \times k \dots\dots\dots (7-4)$$

( $T_s$ : モジュール温度 [°C],  $T_a$ : 気温 [°C],  $V_s$ : モジュールから上 1.5 [m]の  
 ところの風速 [m/s],  $V_b$ : 空気層内風速 [m/s],  $k$ : 吸収係数)

ここの吸収係数は四季についての係数となり,

- 春(3~5月):  $k = 0.44$
- 夏(6~8月):  $k = 0.53$
- 秋(9~11月):  $k = 0.4$
- 冬(12~翌年の2月):  $k = 0.27$

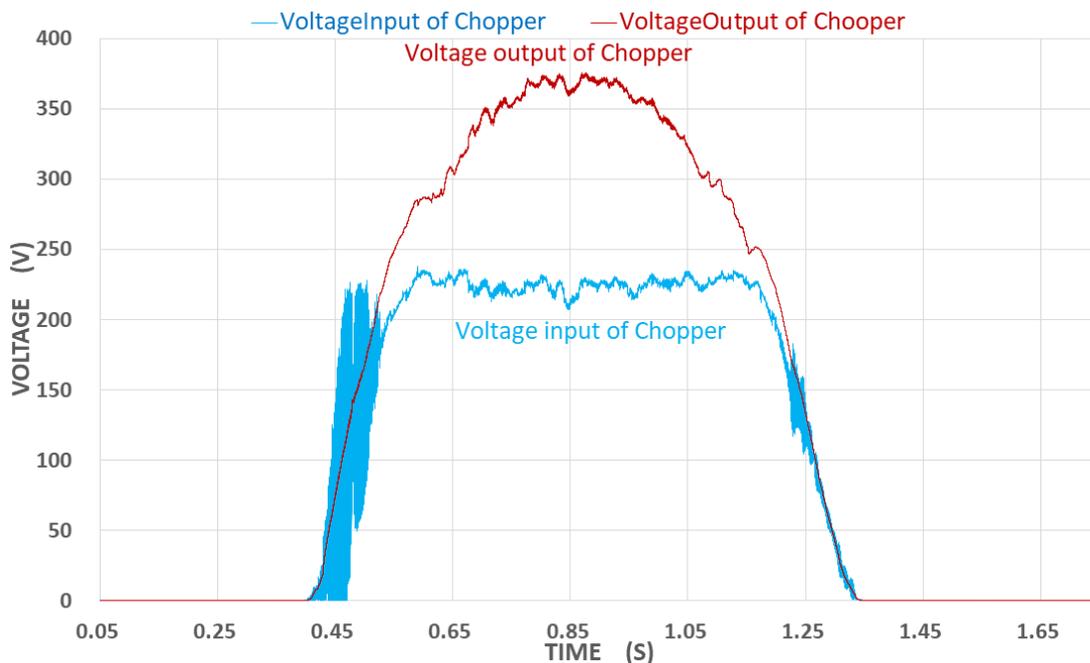
である。式(7-2)と式(7-3)は実測値からの経験式である。[F2-1]~[F2-3]

式(7-1)~式(7-4)を整理すると、太陽電池モジュールの表面温度は式(7-5)の  
 ようになる。

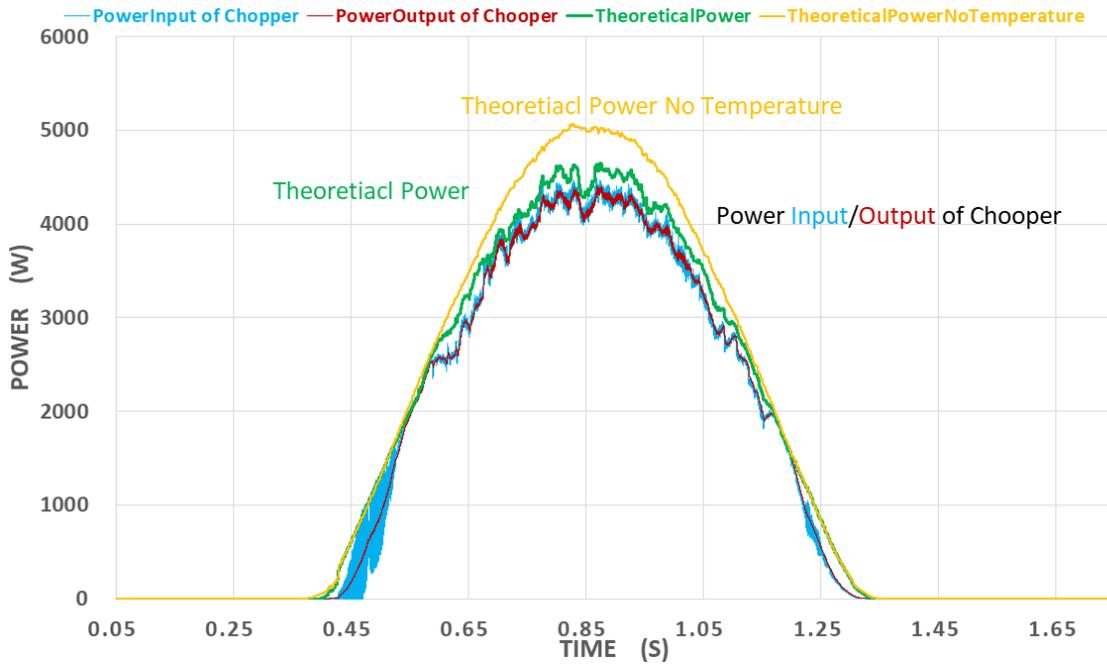
$$\text{モジュール温度: } T_s = \frac{L \cdot k}{6.0359 \cdot V_s + 3.3002} + T_a \quad \dots\dots\dots (7-5)$$

### F2.1.1.3 太陽電池モジュール表面温度計算ありのシミュレーション

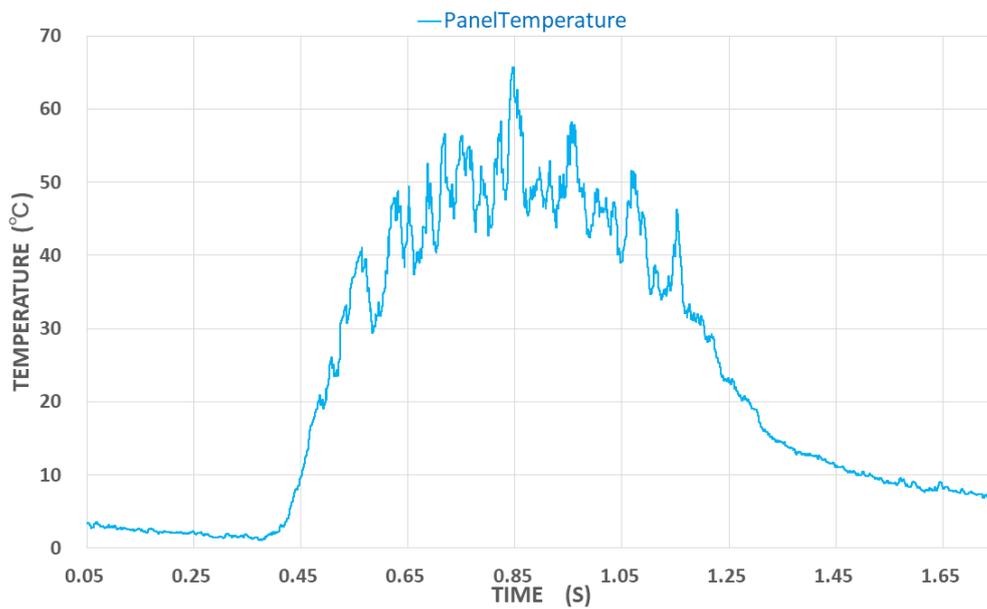
式(7-5)を用いて、シミュレーションを行った。その結果は Fig.F2-5 に示され  
 ている。



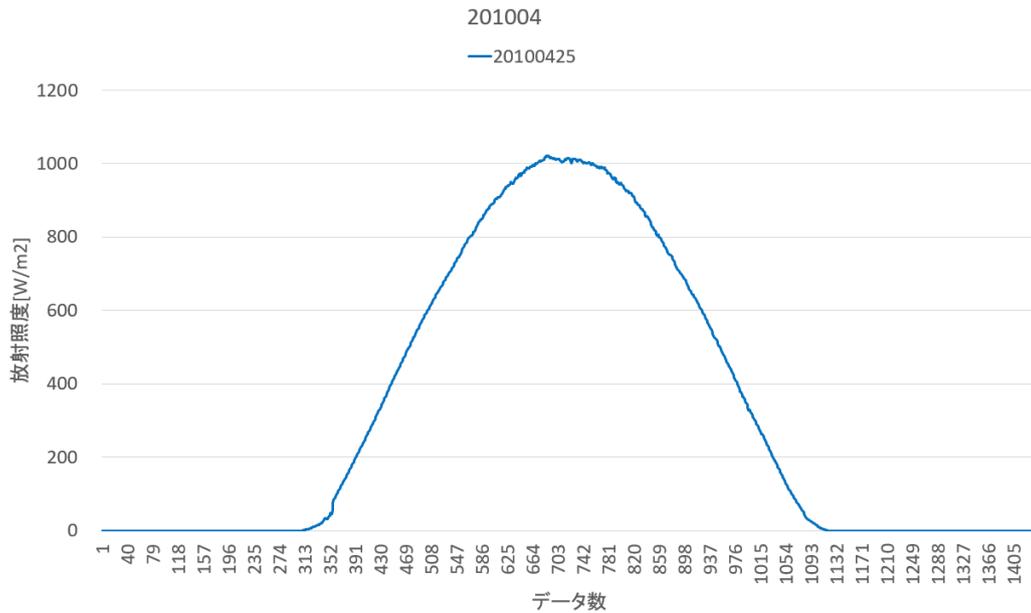
(a) 昇圧回路の入出力電圧



(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 計算した太陽電池モジュールの表面温度



(d) 全天放射照度

Fig.F2-4 2010年4月25日の出力の様子(モジュール表面温度：計算から)

Fig.F2-4より、(a)は電圧、(b)の緑の TheoreticalPower はモジュール表面温度計算を含める理論電力出力, 黄色の TheoreticalPowerNoTemperature はモジュール表面温度を 25℃とした理論電力出力である。青と赤は昇圧回路の入出力電力である。(c)は計算した太陽電池モジュールの表面温度である。(d)は入力する放射照度の波形である。表面温度の波形を見ると、温度が細かく上下している。それは太陽電池モジュールにはセルがある部分が薄く (数 [mm]だけ)、シリコンのセルと数層のガラス板・アクリル板あるいはプラスチック板で構成されるので、蓄熱が大量に貯められないと考える。よって、風速による放熱で温度差が上下している。

結果より、太陽電池モジュールの出力は温度の影響を受けやすいことがわかった。シミュレーションの中に温度の計算を含めたほうが良いと考えられた。

## F2.2 気象データを用いる日発電量の統計

太陽光発電システムに対する重要な評価基準の一つは発電量である。本節には一日中の発電量についての検討も含めている。

### F2.2.1 シミュレーションによる日発電量の統計

本節には日中発電量について検討する。ここでは数値積分に台形法を利用する。

台形法あるいは台形公式は定積分を近似計算するための方法、すなわち数値積分の一つである。

$$\text{台形公式: } \int_a^b f(x)dx \approx (b - a) \frac{f(a)+f(b)}{2} \dots\dots\dots (7-6)$$

天気データでは一回のデータの時間長は 1 分である。一日中のデータ数は 1440 個である。そして毎回シミュレーションの刻みは 5 [μsec] で、240 回のおよそ次のデータに設定する。ここで、240 回シミュレーションの累積時間長を 60 [sec] に拡大すると、その倍数は 50000 である。

すなわち、毎回シミュレーションで電力量を台形公式で計算し、結果に 50000 をかけ、240 回シミュレーションの結果を足し算すると 1 [min] の発電量が計算できる。最後に単位を換算し [kWh] の形にして波形図になる。

C-block を使い、Fig.F2-5 のような回路を構成した。太陽電池アレイ出力電圧 (VoltageInput) ・電流 (CurrentInput), 昇圧回路出力電圧 (VoltageOutput) ・電流 (CurrentOutput), 理論アレイ出力電力 (Pt) と温度特性なしの理論出力電力 (PtnoT) を入力し、出力は瞬時アレイ出力電力 (Power\_Input), 昇圧回路の瞬時出力電力 (Power\_Output) ・アレイ出力電力量 (ElectricalEnergyInput) ・昇圧回路の出力電力量 (ElectricalEnergyOutput) ・温度特性なしのアレイ出力電力量 (ElectricalEnergyInputNoTemp) Efficiency である。

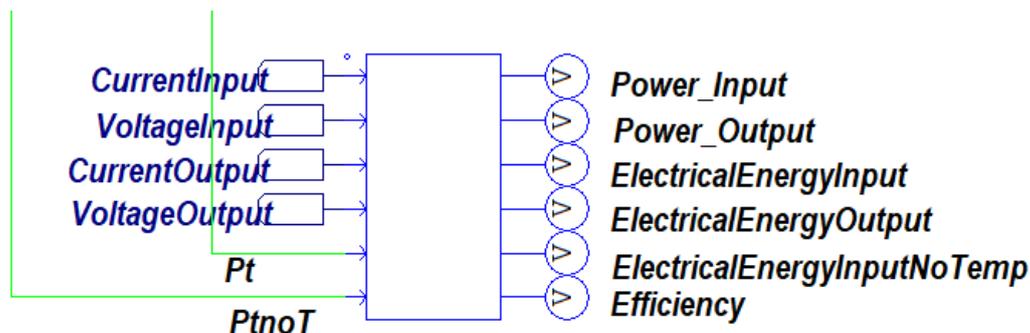
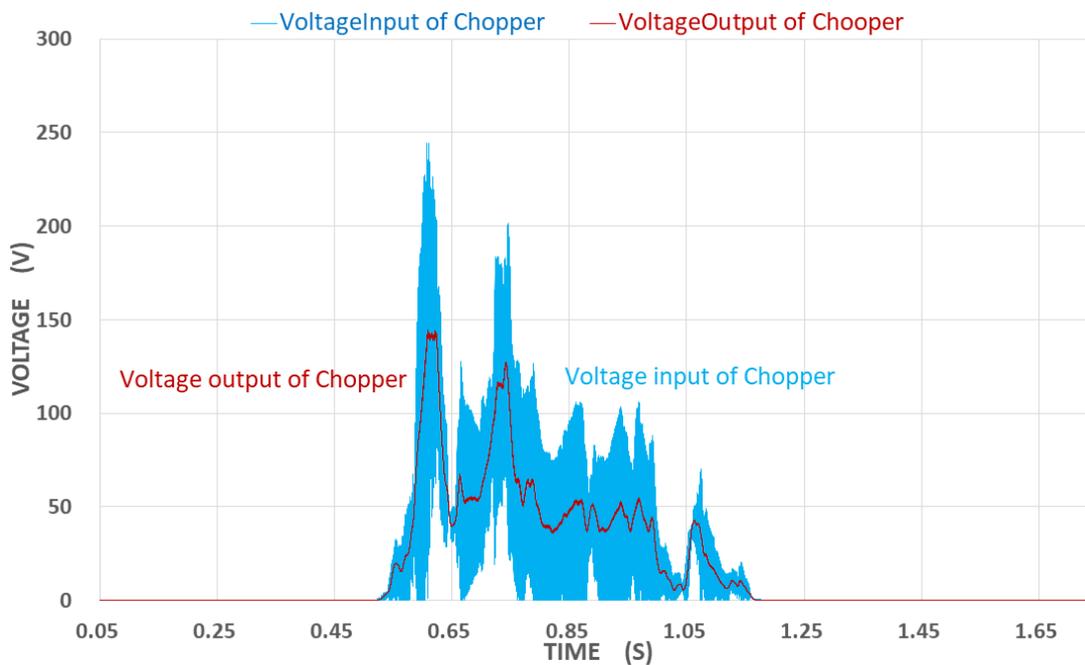


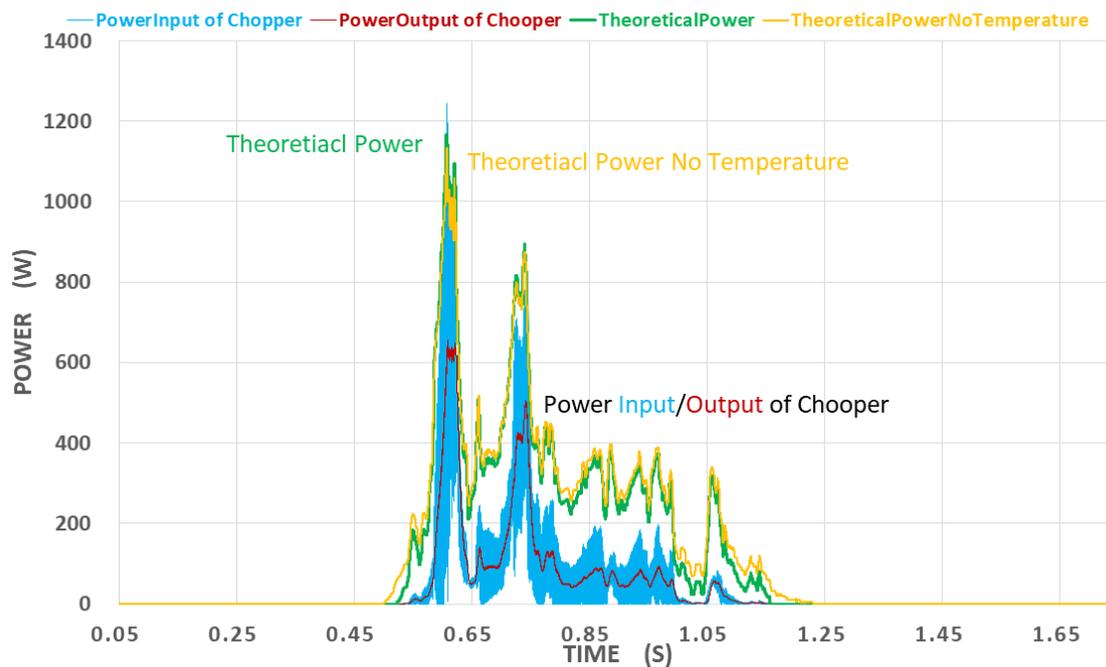
Fig.F2-5 電力と電力量の計算 C-block

次に相違なる天気および季節の発電量をシミュレーションでまとめる。その

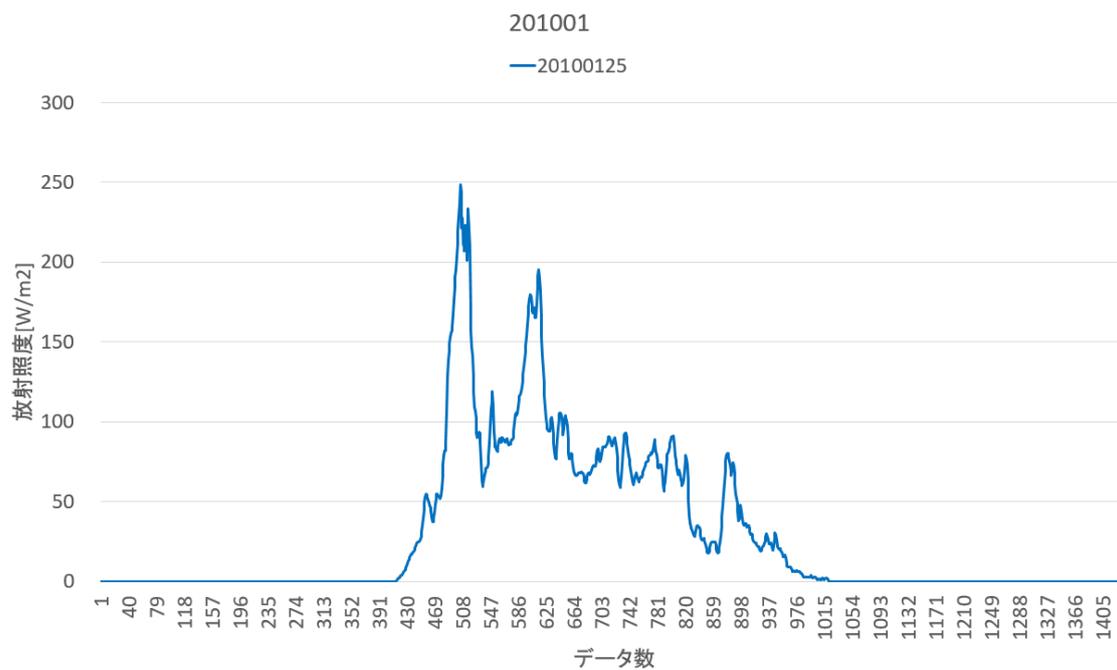
結果は Fig.F2-6～Fig.F2-9 に示されている。



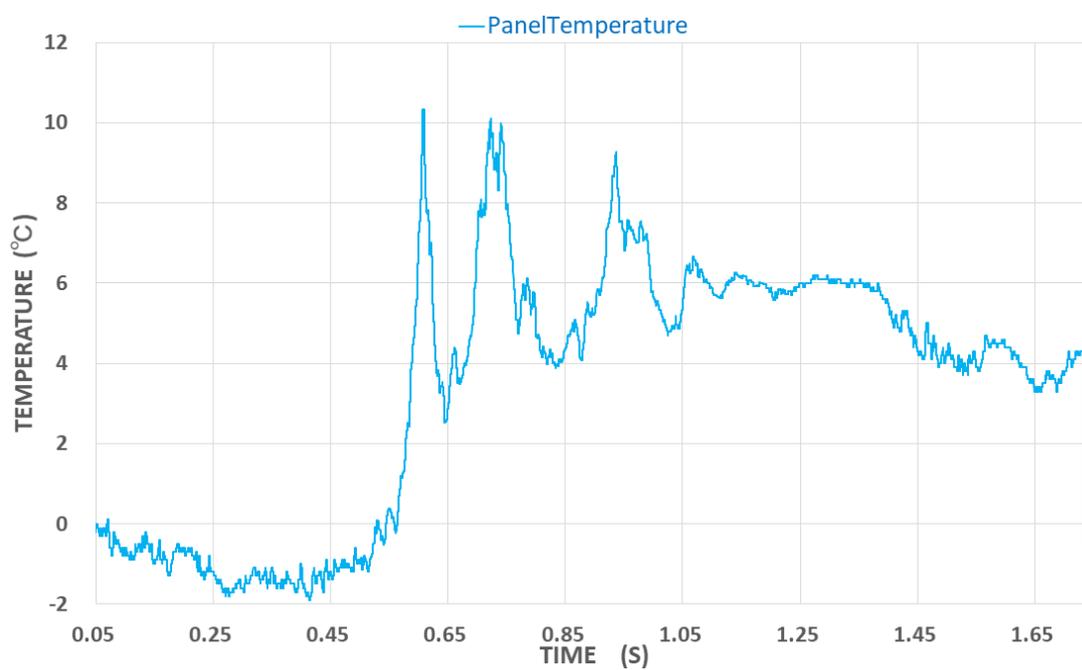
(a) 昇圧回路の入出力電圧



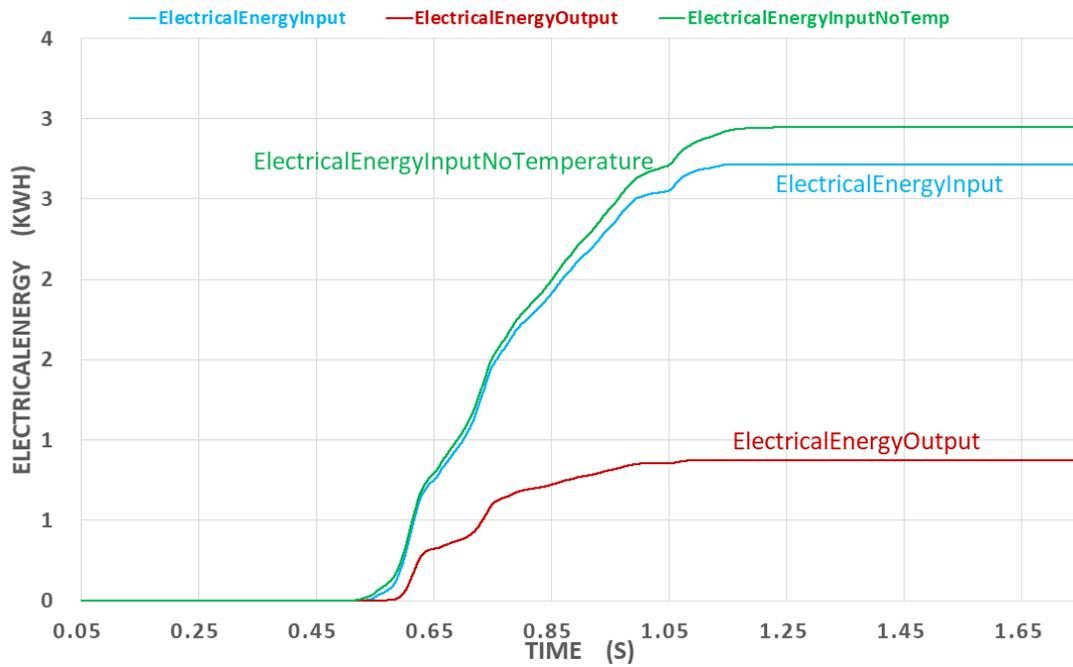
(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 全天放射照度

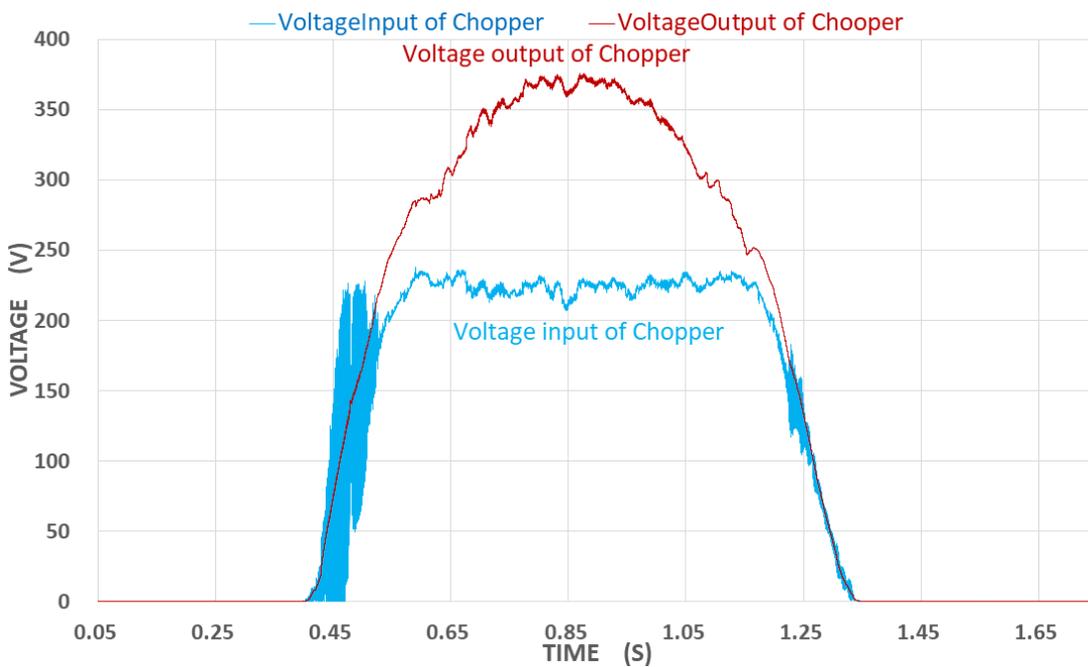


(d) 太陽電池モジュール表面温度

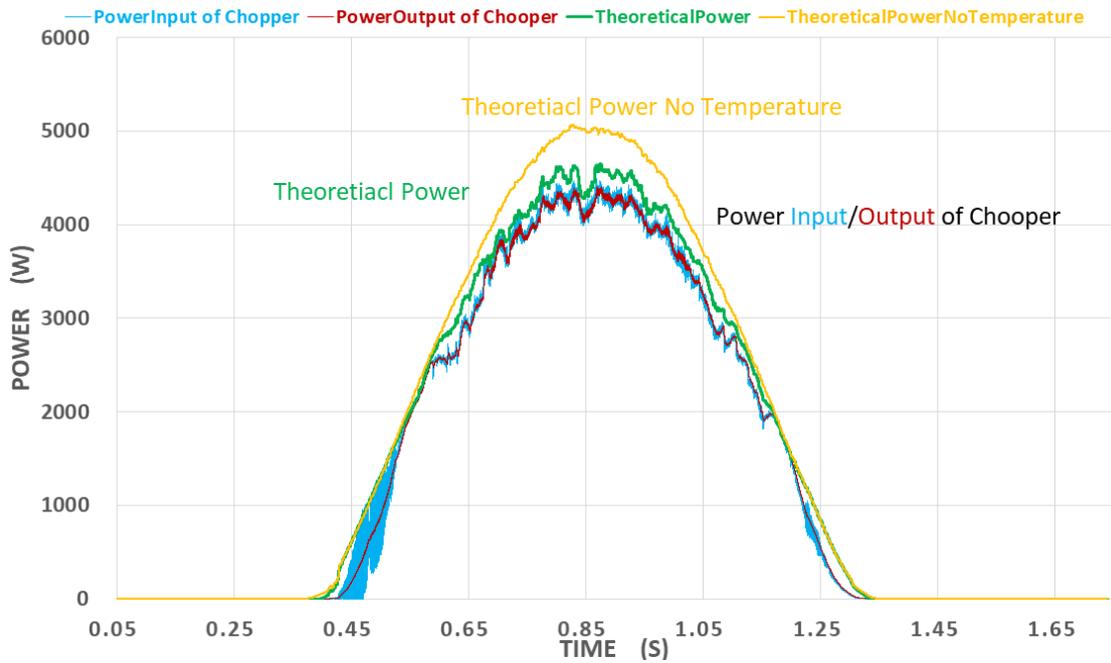


(e) 統計電力量

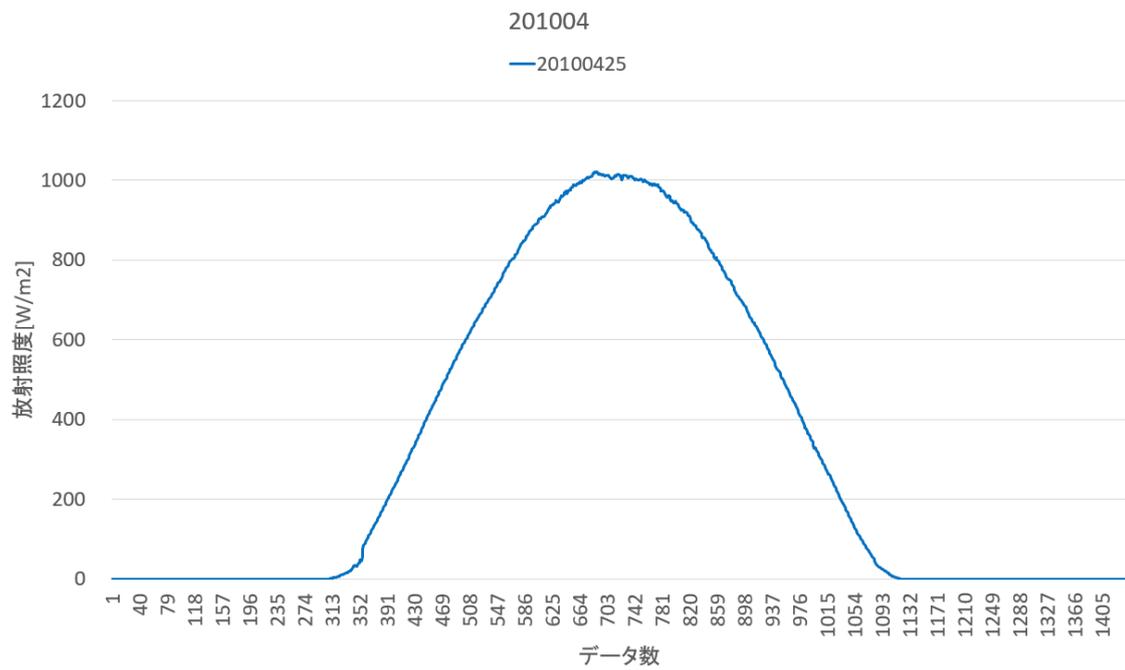
Fig.F2-6 2010年1月25日



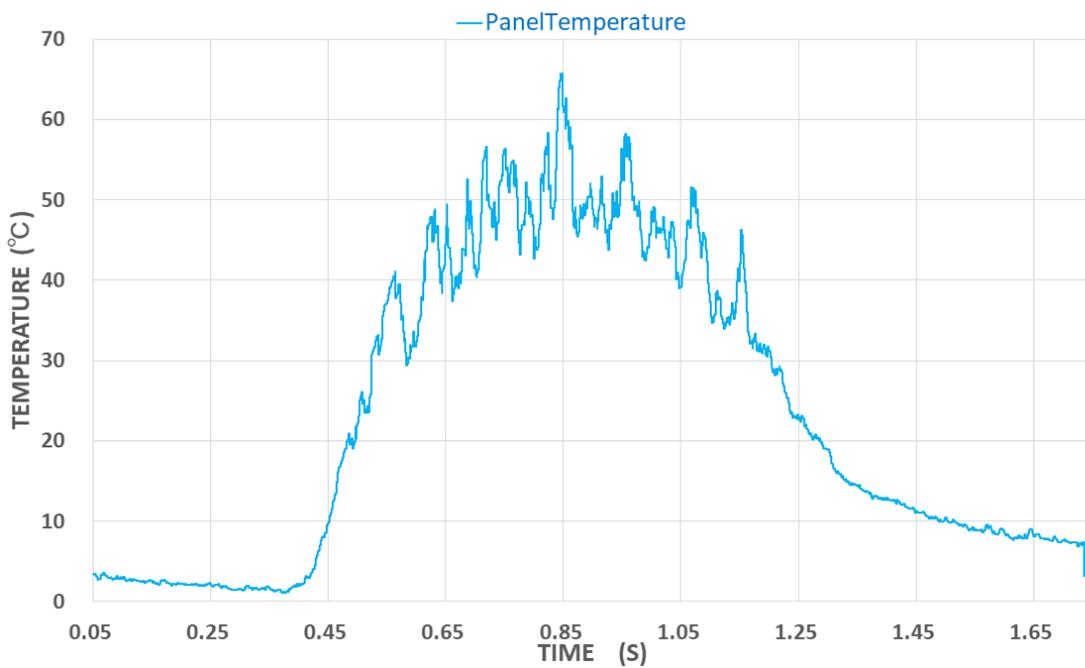
(a) 昇圧回路の入出力電圧



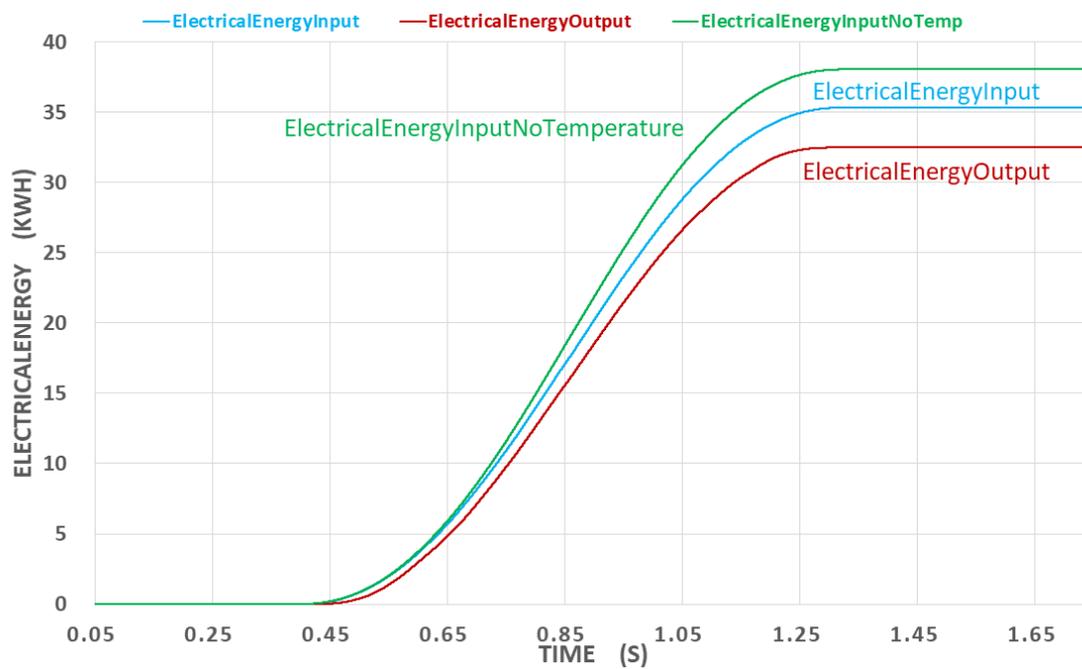
(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 全天放射照度

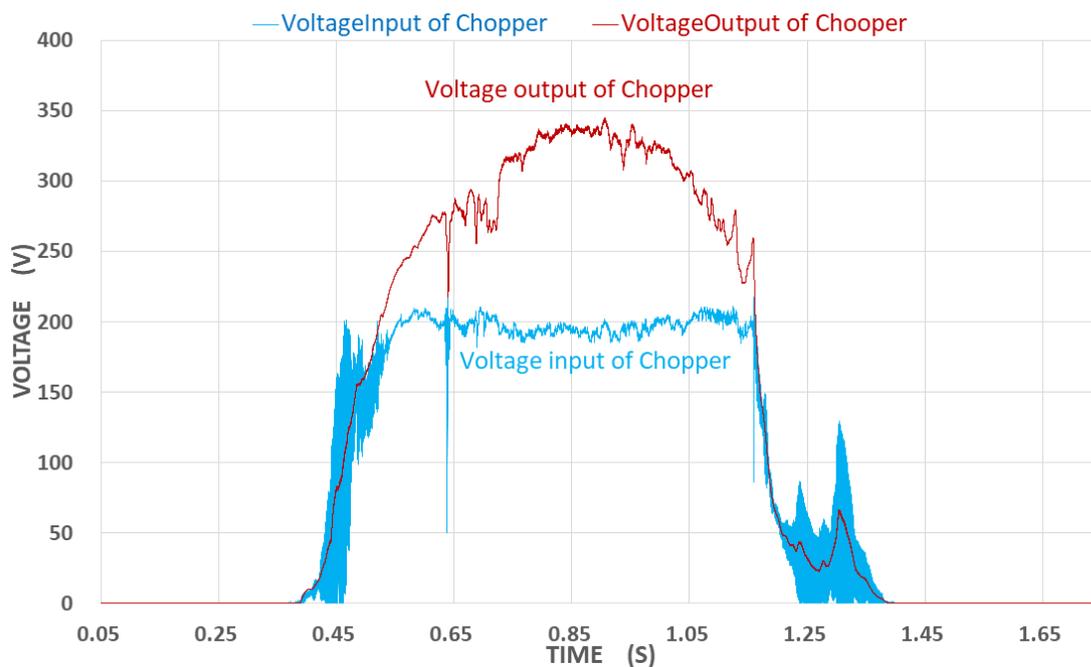


(d) 太陽電池モジュール表面温度

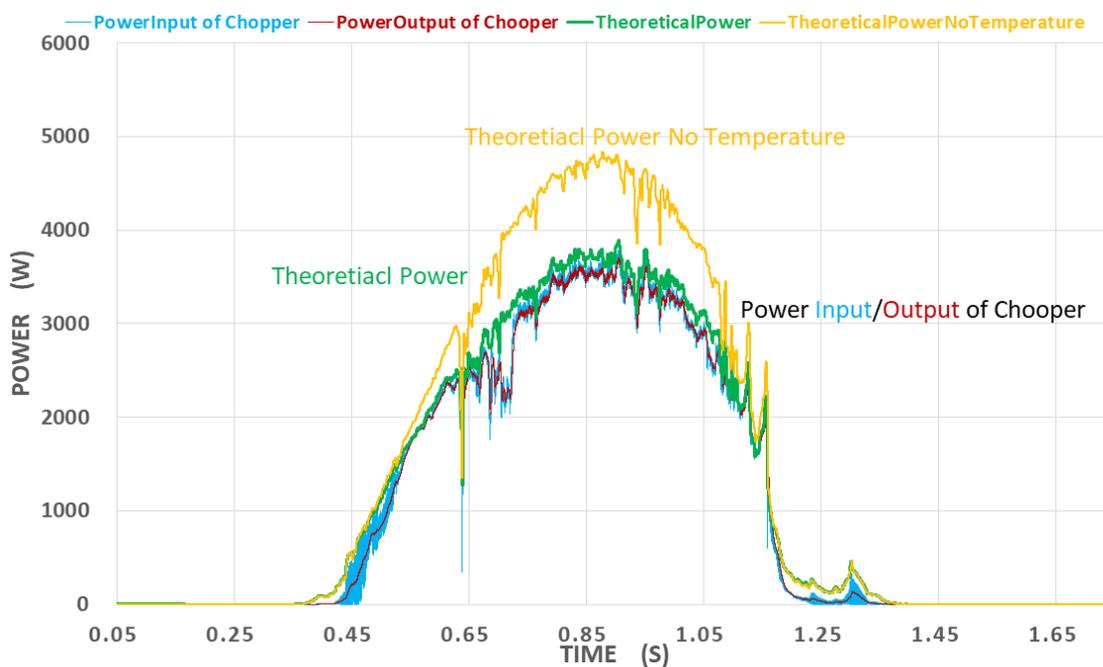


(e) 統計電力量

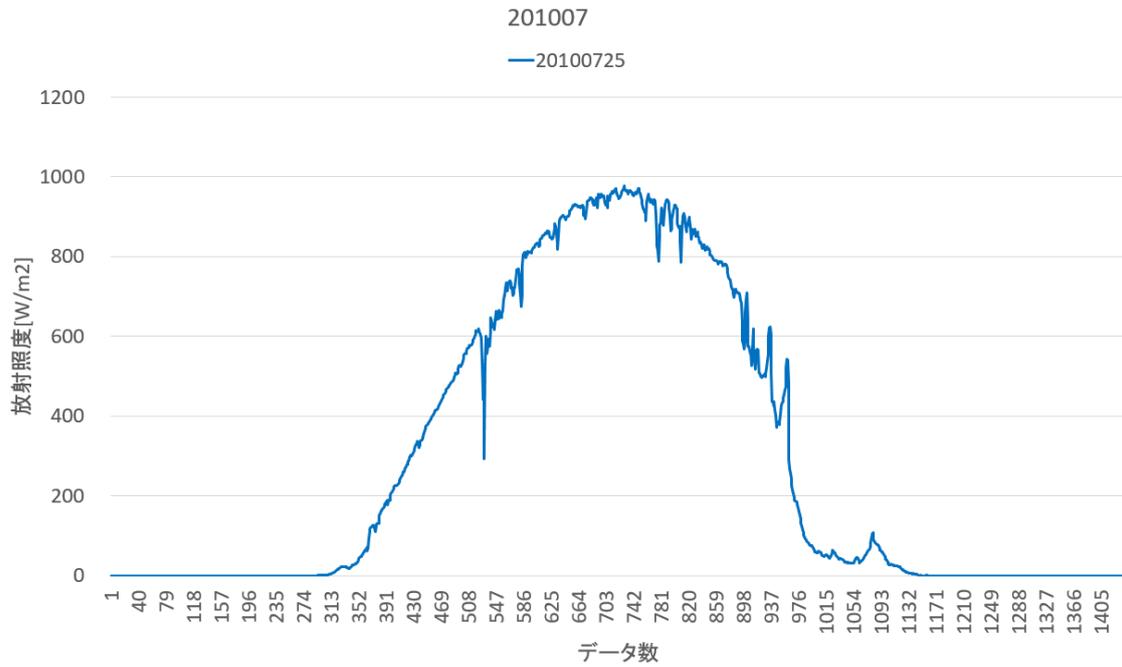
Fig.F2-7 2010年4月25日



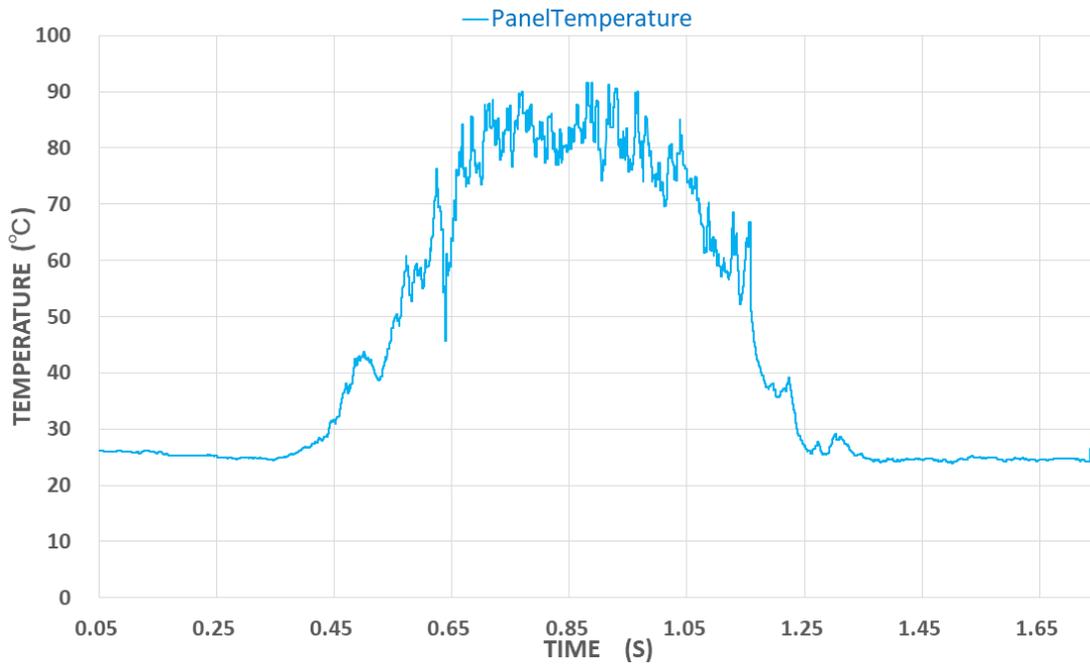
(a) 昇圧回路の入出力電圧



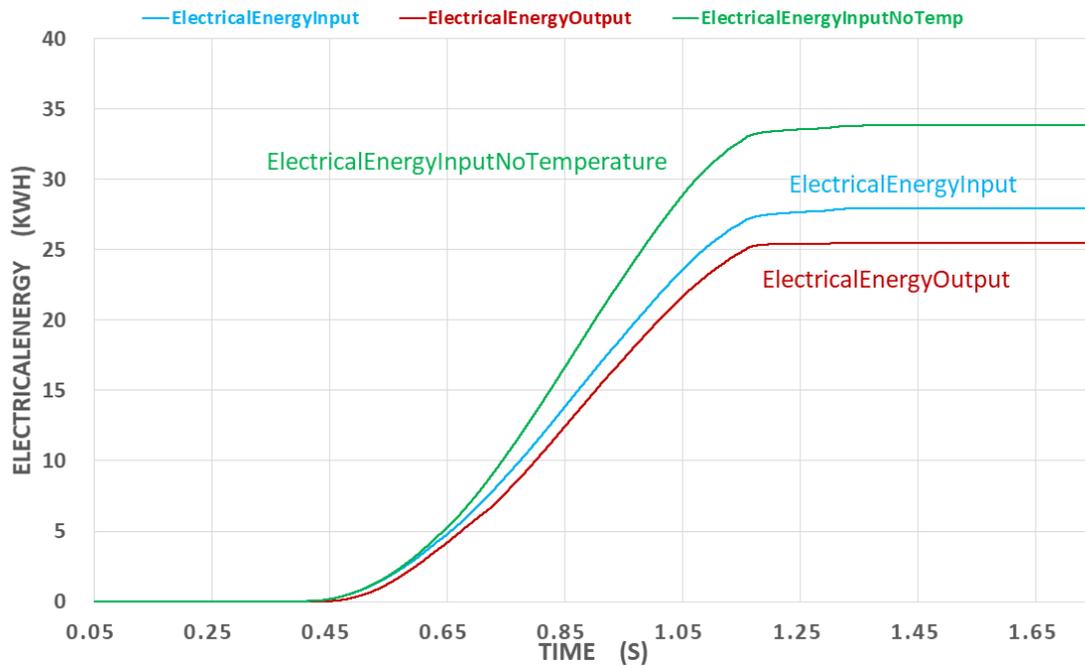
(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 全天放射照度

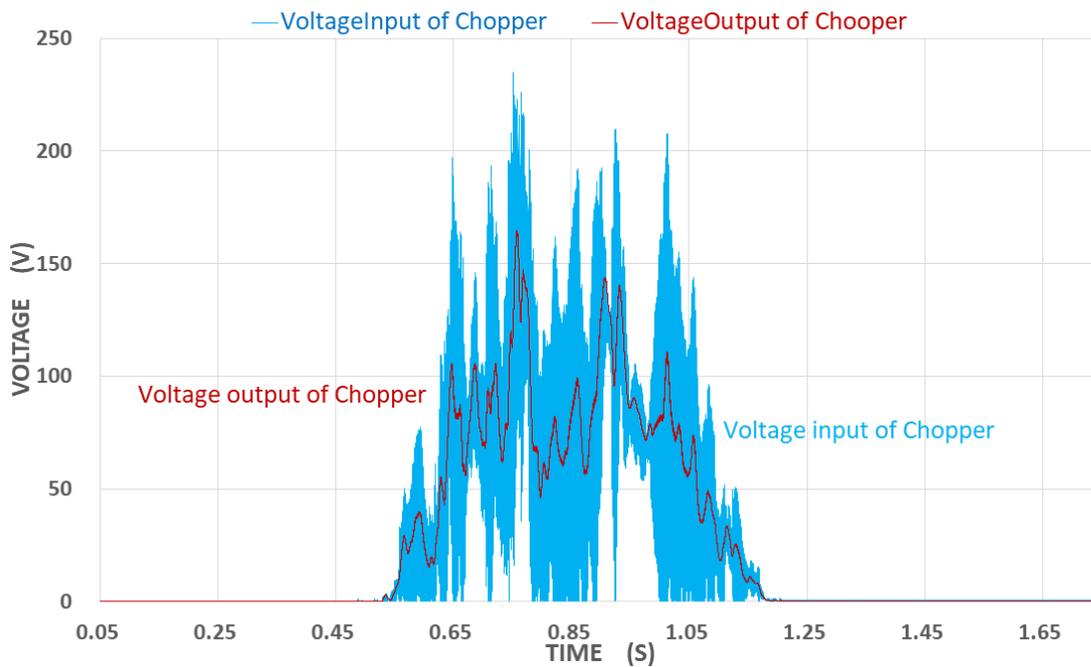


(d) 太陽電池モジュール表面温度

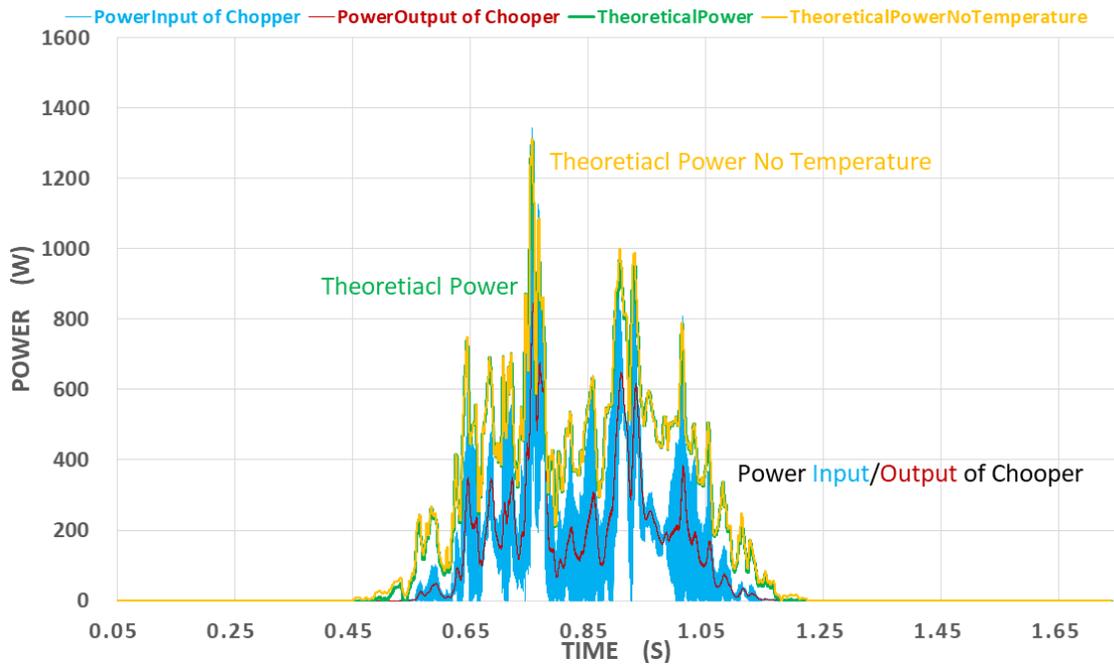


(e) 統計電力量

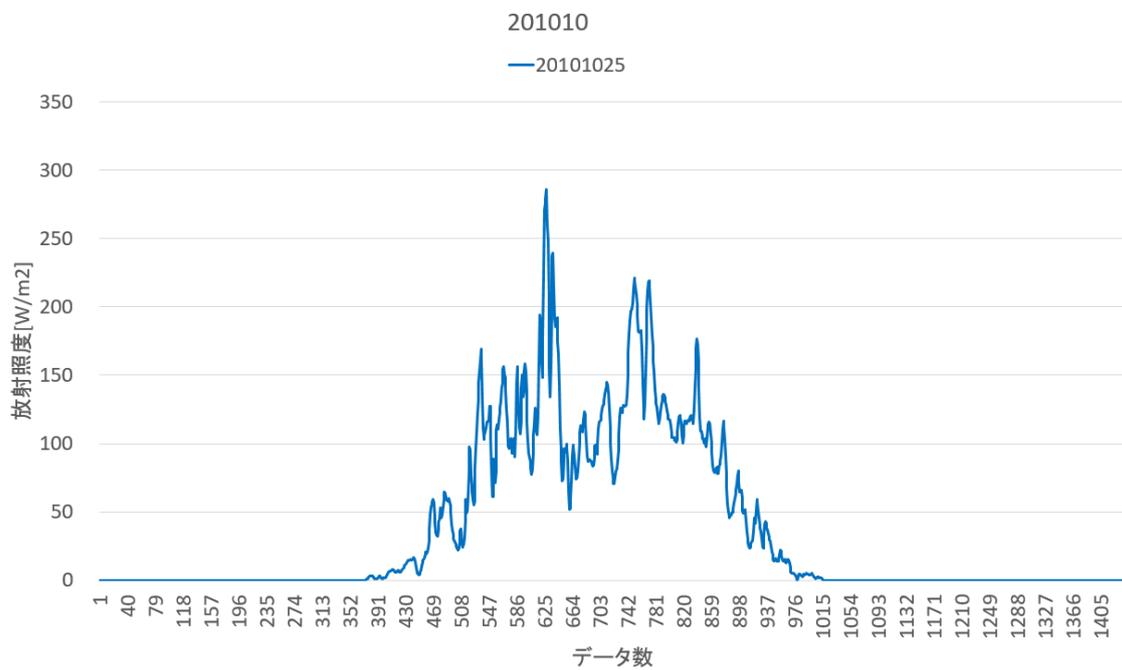
Fig.F2-8 2010年7月25日



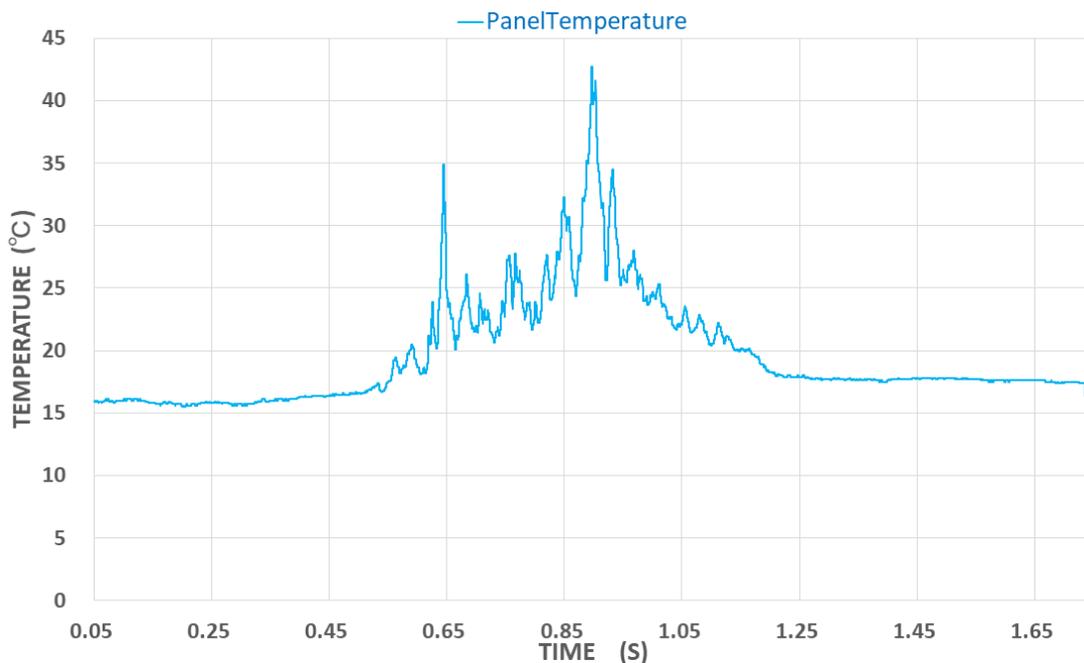
(a) 昇圧回路の入出力電圧



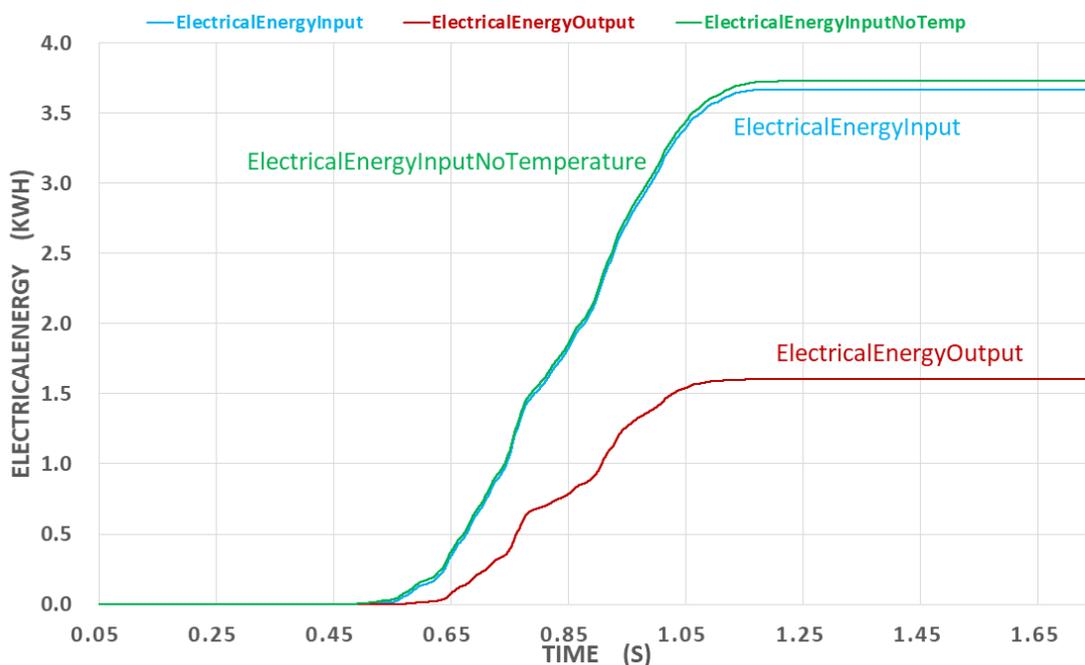
(b) 昇圧回路の入出力電力



(c) 全天放射照度



(d) 太陽電池モジュール表面温度



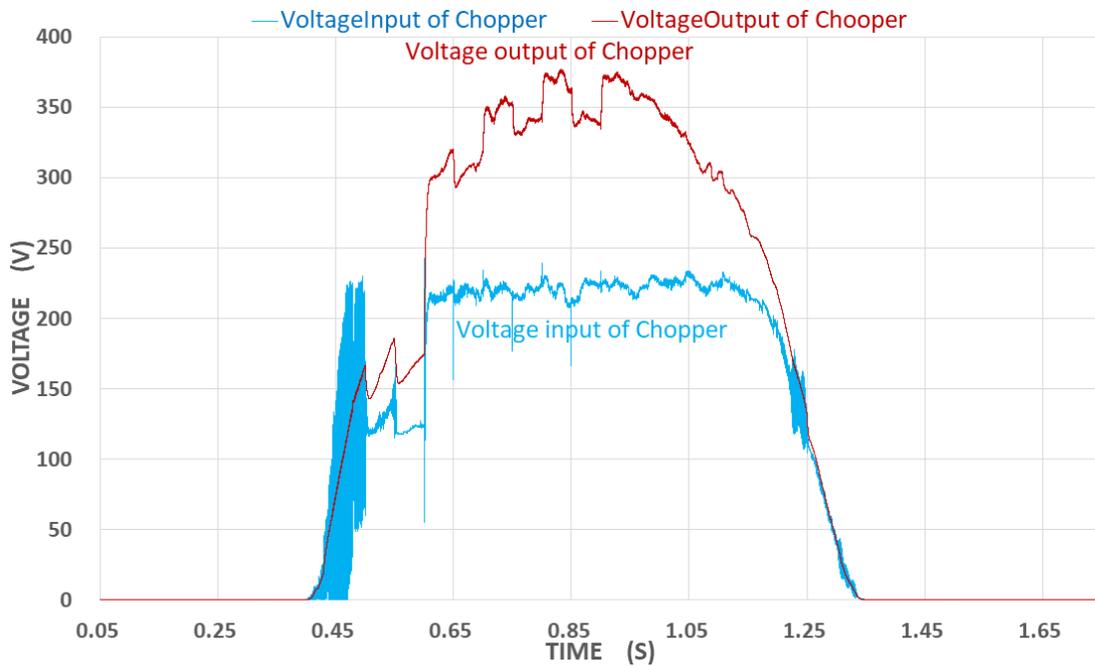
(e) 統計電力量

Fig.F2-9 2010年10月25日

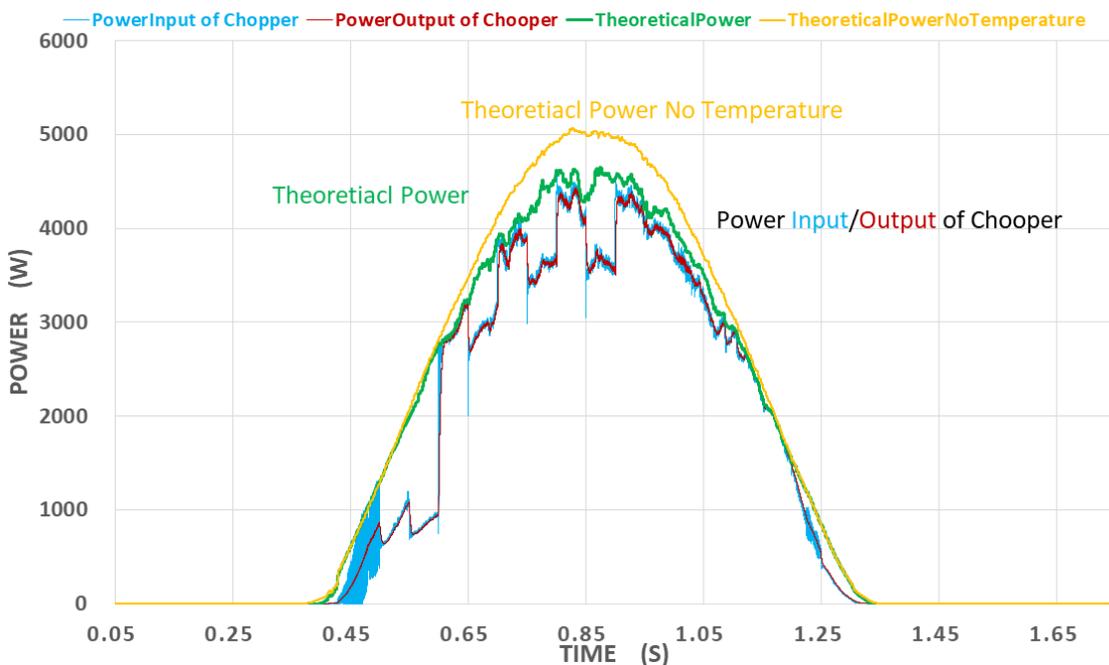
Fig.F2-6～Fig.F2-9より、Fig.F2-6とFig.F2-9の天気は曇りのため、発電が全然できなかった。しかし、Fig.F2-7とFig.F2-8のような晴れの天気には比較的発電できた。一方、発電量の図より、同じ程度の放射照度でも、発電量は気温や太陽電池モジュールの表面温度の影響を受けやすかった。夏の気温が高かったため発電量は春より少なかった。

### F2.2.2 部分陰の影響ありの日発電量統計及び部分陰の位置判定

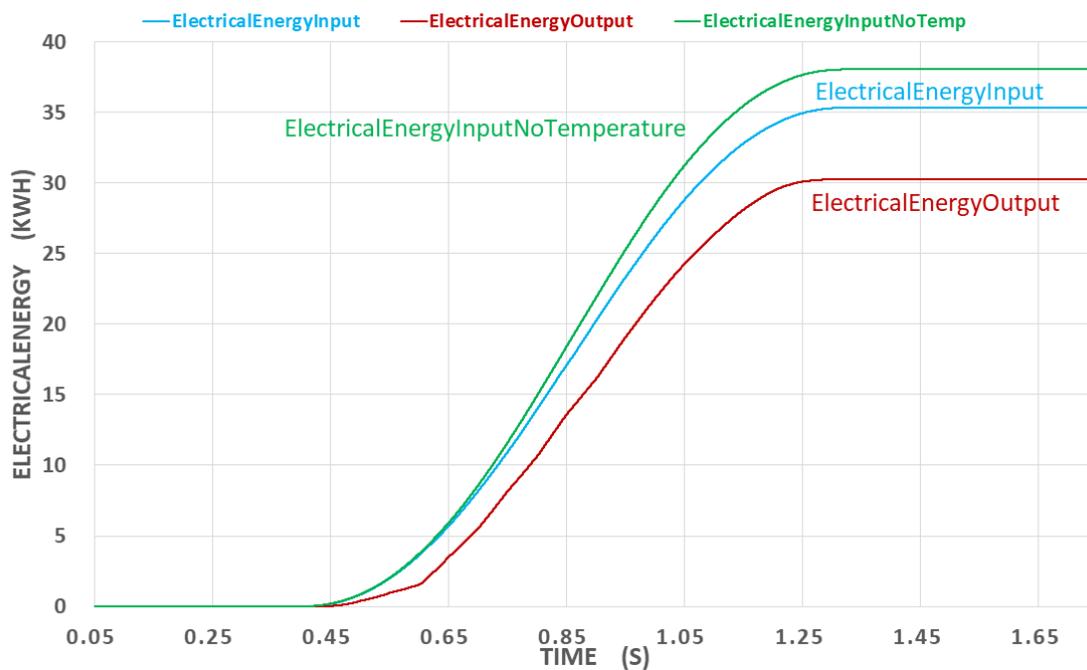
最後に正規分布の部分陰を導入する。天気データが一番良い 2010 年 4 月 25 日のデータを利用する。Fig.F2-10 に示している。



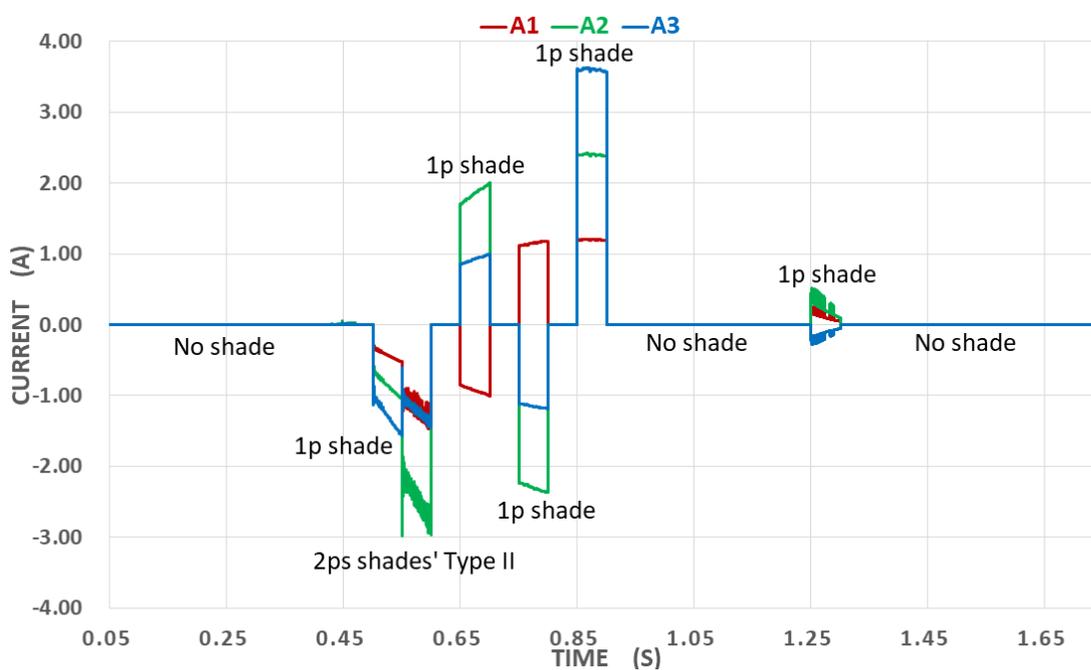
(a) 昇圧回路の入出力電圧



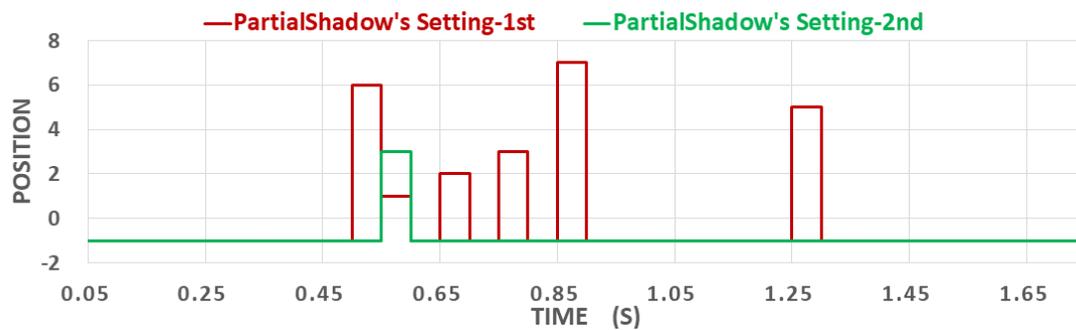
(b) 昇圧回路の入出力電力



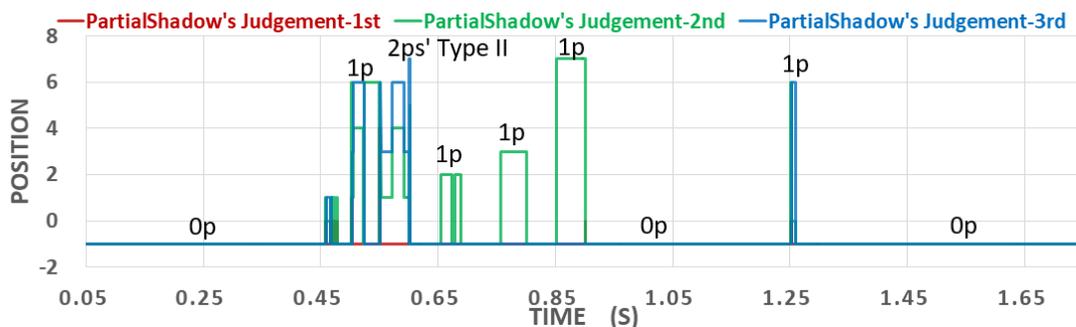
(c) 統計電力量



(d) ブリッジ電流



(e) 部分陰の設定



(f) 部分陰の位置判定

Fig.F2-10 2010年4月25日の天気データを用いる部分陰の位置判定

Fig.F2-10(c)と Fig.F2-7(e)を比較すると、部分陰における電力損失は甚大と言える。発電量の損失も約3[kWh]に至った。シミュレーションでの毎回部分陰発生時間は0.1秒で、一日に換算すると約85分間太陽電池アレイにかかった。

## F2.3 室内実験用光源の自作

太陽光発電に関する実験には太陽光を使うのが最適である。ところが、実験を行うタイミングの天気や時間等の影響で、太陽電池モジュールに適切な放射照度の光が安定的に使用できるとは言えない。なお、比較実験の場合は実験の外部条件が違ふとそもそもその結果の再現性及び説明力が低いと考える。よって、室内実験できるような安定的な光源があれば、以上に述べた問題が解決できる。本節には自作 LED 光源の開発経緯と設計を記述する。結果として、自作光源の最大放射照度は通常の太陽光放射照度の約 40%程度となった。

### F2.3.1 光の基礎知識

照明に関する指標は以下のように指定されている：

光束 (luminous flux)：とある面を通過する光の明るさを表す物理量である。SI 単位はルーメン [lm]。光源を囲む面を貫く光束は全光束と呼ばれる。ランプの仕様は全光束によって表すことが多い。

照度 (il luminance)：物体の表面を照らす光の明るさを表す物理量である。SI 単位はルクス [lx] 又はルーメン毎平方メートル [lm/m<sup>2</sup>] である。照度は照射された側の指標を表す。

放射照度 (irradiance)：物体へ時間あたりに照射される、面積あたりの放射エネルギーを表す物理量である。SI 単位はワット毎平方メートル [W/m<sup>2</sup>] である。放射照度も照射される側の指標であるが、注目点は明るさではなく光の各波長のエネルギーの加算である。

計量器として、照度計と放射照度計がある。太陽光発電に対する検証実験にとって、放射照度を直接に測ることは最善であるが、現時点所持している計量器の中に一番精度がいいのは照度計のため、両方の換算が必要だと考える。ところが光の波長ごとに計算して足し合わせる作業が非常に面倒であり実用性がない。そのために光量子束密度・放射照度と照度の間の換算係数を計算した論文[F2-4]があり、その論文の数値を利用すると、簡易的・近似的に光の単位を相互に変換することができる。なお、この計算の適用波長範囲は 400~700 [nm] である。

その方法は：

$$\text{放射照度} \xrightarrow{\text{A でかけ算する}} \text{光量子束密度} \xrightarrow{\text{B でかけ算する}} \text{照度} \quad \dots(7-7)$$

$$\text{照度} \xrightarrow{\text{B で割り算する}} \text{光量子束密度} \xrightarrow{\text{A で割り算する}} \text{放射照度} \quad \dots(7-8)$$

前述の論文[F2-4]の結論としての換算係数は Table.F2-3 にまとめるとおりである。

Table.F2-3 換算係数

光源の種類	A	B
昼間の光 (太陽と青空)	4.57	54
青空の部分の光	4.24	52
メタルハライドランプ	4.59	71
暖色白色蛍光灯	4.67	76
クールホワイト蛍光灯	4.59	74
白熱灯	5.00	50

ただし、今回の光源には白光 LED 電球を使用するので、Table.F2-3 のような換算係数が使用できないと考える。以下には実験データの測定結果により、LED 電球用の換算係数を試算する。

### F2.3.2 LED 電球の仕様と特性

本光源に使っている LED 電球は CREE 社の Xlamp XP-G シリーズの表面実装 LED を専用のスター型アルミ基板に実装したものである。LED 電球の仕様は以下の Table.F2-4・Table.F2-5・Fig.F2-11 と Fig.F2-12 に示されている。

Table.F2-4 電気と温度特性

Characteristics	Unit	Typical	Maximum
Thermal Resistance, junction to solder point	°C/w	4	
Viewing Angle (FWHM)	degrees	125	
Temperature Coefficient of Voltage	mV/°C	-2.1	
DC Forward Current	mA		1500
Reverse Voltage	V		5
Forward Voltage (@ 350 mA, 25°C)	V	2.9	3.25
Forward Voltage (@ 700 mA, 25°C)	V	3.05	
Forward Voltage (@ 1000 mA, 25°C)	V	3.15	
Forward Voltage (@ 1500 mA, 25°C)	V	3.25	
LED Junction Temperature	°C		150

Table.F2-5 光特性

lumen (min)	I <sub>F</sub> (mA)	V <sub>F</sub> (V)	Wat (W)	lumen/W
130	350	2.9	1.015	128
243	700	3.05	2.135	114
325	1000	3.15	3.150	103
433	1500	3.25	4.875	88

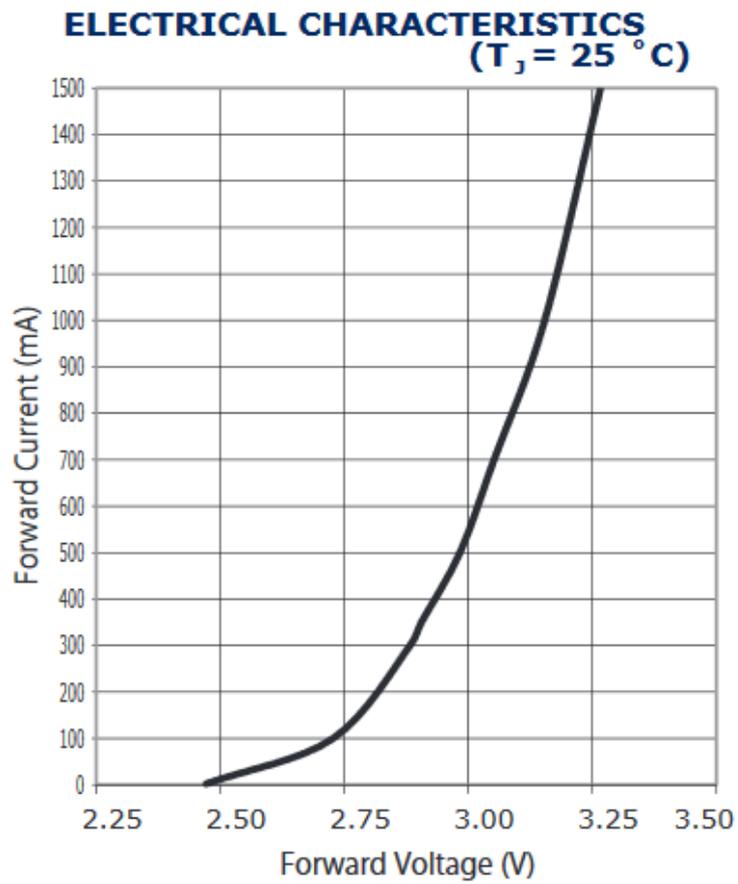


Fig.F2-11 順電圧特性

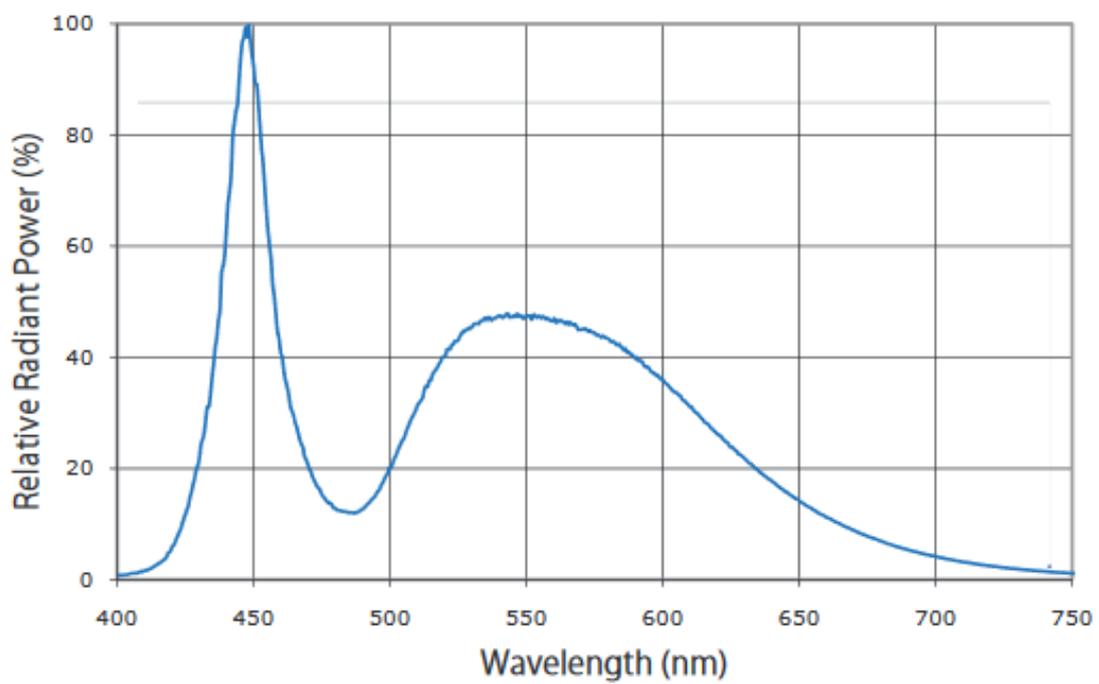


Fig.F2-12 LED のスペクトル

白色 LED 電球は青色の LED ダイオードと赤と緑の蛍光粉に作られたものである。よって、Fig.F2-12 に示す LED のスペクトル図よって、波長 450 [nm] の青色の強度が一番高い。その青色の光を蛍光粉に照射すると、赤色と緑色の光が出て、三色を混ぜて白色ができる。

しかし、このような発光原理で生じる光のスペクトルと実際の太陽光のスペクトルとは異なる。Fig.F2-12 と Fig.F2-13 と比較すると、明らかに太陽光の波長範囲が広い。理論的に放射照度とはスペクトルの積分である。従って、LED 光源で太陽光の放射照度と同じレベルにするために、LED 光源の照度を非常に高めないと行けない。すなわち、面積を相当にすることである。

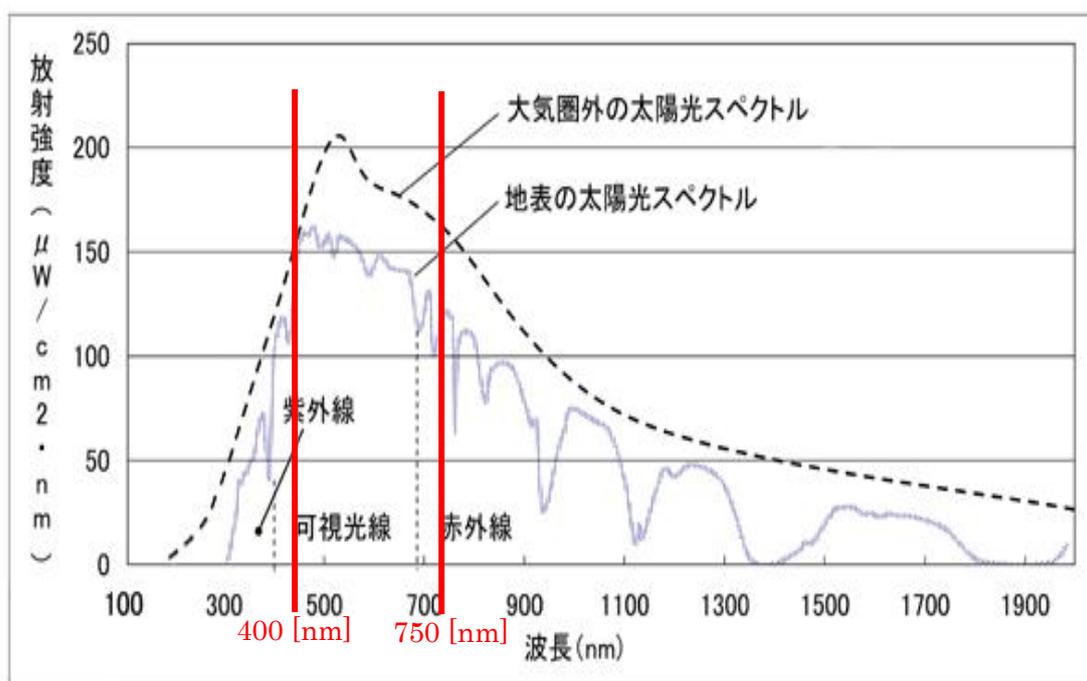


Fig.F2-13 太陽光のスペクトル

よって、Table.F2-3 の換算係数は直接に代用できないので、改めて一個の LED の特性を測定する実験を行う。測定データを Table.7-6 にまとめる。

Table.F2-6 換算係数の測定実験データ

電流 [mA]	電圧 [V]	実測照度 [x1000lux]	実測放射照度 [W/m <sup>2</sup> ]	光束 [lm]	換算係数
50	2.76	2.5	6.5	25.77	384.62
100	2.85	5	13.5	51.53	370.37
150	2.92	7.3	19.9	75.23	366.83
200	2.97	9.5	26.4	97.91	359.85
250	3.01	12.9	32.2	132.95	400.62
300	3.04	15.2	37.9	156.65	401.01
350	3.07	17.2	43.3	177.27	397.23
400	3.1	19.1	48.1	196.85	397.09
450	3.13	21.2	53.1	218.49	399.25
500	3.15	23	57.7	237.04	398.61
550	3.17	24.7	62.1	254.56	397.75
600	3.19	26.4	66.3	272.08	398.19
650	3.21	27.9	69.8	287.54	399.71
700	3.22	29.2	73.6	300.94	396.74
750	3.24	30.7	77	316.40	398.70
800	3.25	31.9	80.1	328.77	398.25
850	3.27	33	83.1	340.10	397.11
900	3.29	34.2	86	352.47	397.67
950	3.3	35.1	88.5	361.75	396.61
1000	3.31	36	90.8	371.02	396.48
1050	3.32	36.9	93	380.30	396.77
1100	3.33	37.5	94.8	386.48	395.57
1150	3.34	38	96.5	391.63	393.78
1200	3.36	38.6	98.1	397.82	393.48
1250	3.37	38.9	99.3	400.91	391.74
1300	3.38	39.4	107.9	406.06	365.15
1350	3.39	39.8	108.2	410.18	367.84
1400	3.4	39.8	108.2	410.18	367.84
1450	3.41	39.8	108.3	410.18	367.50
1500	3.42	39.9	108.1	411.21	369.10
1550	3.42	39.2	107.4	404.00	364.99
1600	3.43	38	106.4	391.63	357.14
1650	3.44	36.2	105.6	373.08	342.80
1700	3.45	34.4	104.5	354.53	329.19
1750	3.47	34.2	106.7	352.47	320.52
1800	3.47	31.3	100	322.58	313
				A	B
平均換算係数		388.7169858	換算係数	4.59	84.69

結果としてのLED電球用の換算係数は：

A=4.59 [lm・m<sup>2</sup>/W], B=84.69 [1/m<sup>2</sup>]である。

### F2.3.3 LED 電球のアレイと平均照度の計算法

設計した光源は複数の LED 電球でアレイを組み立てるものである。よって、単一光源の設計法ではなく、全般照明用の平均照度の計算法を利用する。

$$\text{平均照度} : E = \frac{F \times N \times U \times M}{A} \dots\dots\dots (7-9)$$

$$\text{所用灯数} : N = \frac{E \times A}{F \times U \times M} \dots\dots\dots (7-10)$$

但し、 $E$ : 平均照度 [lx],  $A$ : 床面積 [m<sup>2</sup>],  $F$ : 光源光束 [lm],  $N$ : 光源個数,  $U$ : 照明率,  $M$ : 保守率。

光源の個数には上限があるので、この光源の設計は光源個数を指定して平均照度を計算する。

木の板のサイズは910 [mm] × 600[mm]である。LED の配置は 16x10 個、間隔は 50 [mm]のより、有効な床面積は800 [mm] × 500[mm]=0.4 [m<sup>2</sup>]である。光源の光束は 401 [lm]で、データシートの 433 [lm]より小さくなる原因はレンズの利用で通過率が下がることである。保守率は電球の経年劣化である。今回の光源は実験用設備なので、保守率を 1 としてする。

照明率は室指数と天井・壁と床の反射率により確定するものである。室指数の計算は以下の式で計算できる。

$$\text{室指数} = \frac{\text{間口} \times \text{奥行}}{(\text{間口} + \text{奥行}) \times \text{作業面から光源までの高さ}} \dots\dots\dots (7-11)$$

反射率は以下のように確定する。

Table.F2-7 光源の反射率

反射率	天井	壁	床
天井ペイントなし	50%	30%	10%
天井ペイントあり	70%	70%	10%

自作した光源の天井ペイントがあるので、反射率を天井 70%, 壁 70%, 床 10% とし、Table.F2-8 により照明率を決める。

Table.F2-8 LED の室指数と照明率

反射率 [%] 室指数	天井	70			50		30
	壁	70	<b>50</b>	30	50	30	30
	床	10			10		10
0.60	J	0.54	<b>0.44</b>	0.38	0.43	0.38	0.37
0.80	I	0.61	<b>0.52</b>	0.45	0.50	0.45	0.44
1.00	H	0.67	<b>0.59</b>	0.53	0.57	0.52	0.51
1.25	G	0.74	<b>0.66</b>	0.60	0.64	0.60	0.59
1.50	F	0.76	<b>0.70</b>	0.64	0.68	0.63	0.63
2.00	E	0.81	<b>0.76</b>	0.72	0.75	0.70	0.69
2.50	D	0.84	<b>0.80</b>	0.76	0.78	0.76	0.74
3.00	C	0.87	<b>0.82</b>	0.79	0.81	0.78	0.76
4.00	B	0.89	<b>0.86</b>	0.83	0.84	0.81	0.80
5.00	A	0.91	<b>0.88</b>	0.86	0.86	0.84	0.82

従って、平均照度の計算と放射照度の計算は Table.F2-9 のようにまとめられる。

Table.F2-9 平均照度と放射照度の計算

高度 [cm]	室指数	照明率	平均照度 [lx]	放射照度 [W/m <sup>2</sup> ]
5	5.63	0.91	145964	375.49
10	2.81	0.87	139548	358.99
15	1.88	0.81	129924	334.23
20	1.41	0.76	121904	313.60
25	1.12	0.74	118696	305.35
30	0.94	0.67	107468	276.46
35	0.80	0.61	97844	251.70
40	0.70	0.61	97844	251.70
45	0.63	0.54	86616	222.82
50	0.56	0.54	86616	222.82
55	0.51	0.54	86616	222.82
60	0.47	0.54	86616	222.82

ところが、実測で太陽光での照度は約 120 [klx] で、放射照度は AM1.5 の時約 1000 [W/m<sup>2</sup>] まで至ることが普通である。しかし、Table.F2-9 計算した放射照度は実測値の半分以下である。その原因は放射照度の数値は可視光線だけではなく、あらゆる波長の電磁波を全て含めた値であるが、今回の LED 電球の光が可視光線だけである。なお、太陽放射には可視光線が約 47% 含まれるため、計算した数値は正確だと考える。

### F2.3.4 LED 電球を用いる光源の製作

製作した光源と電圧電流の消費量は Fig.F2-14 に示されている。動作時の様子を Fig.F2-15 に示す。

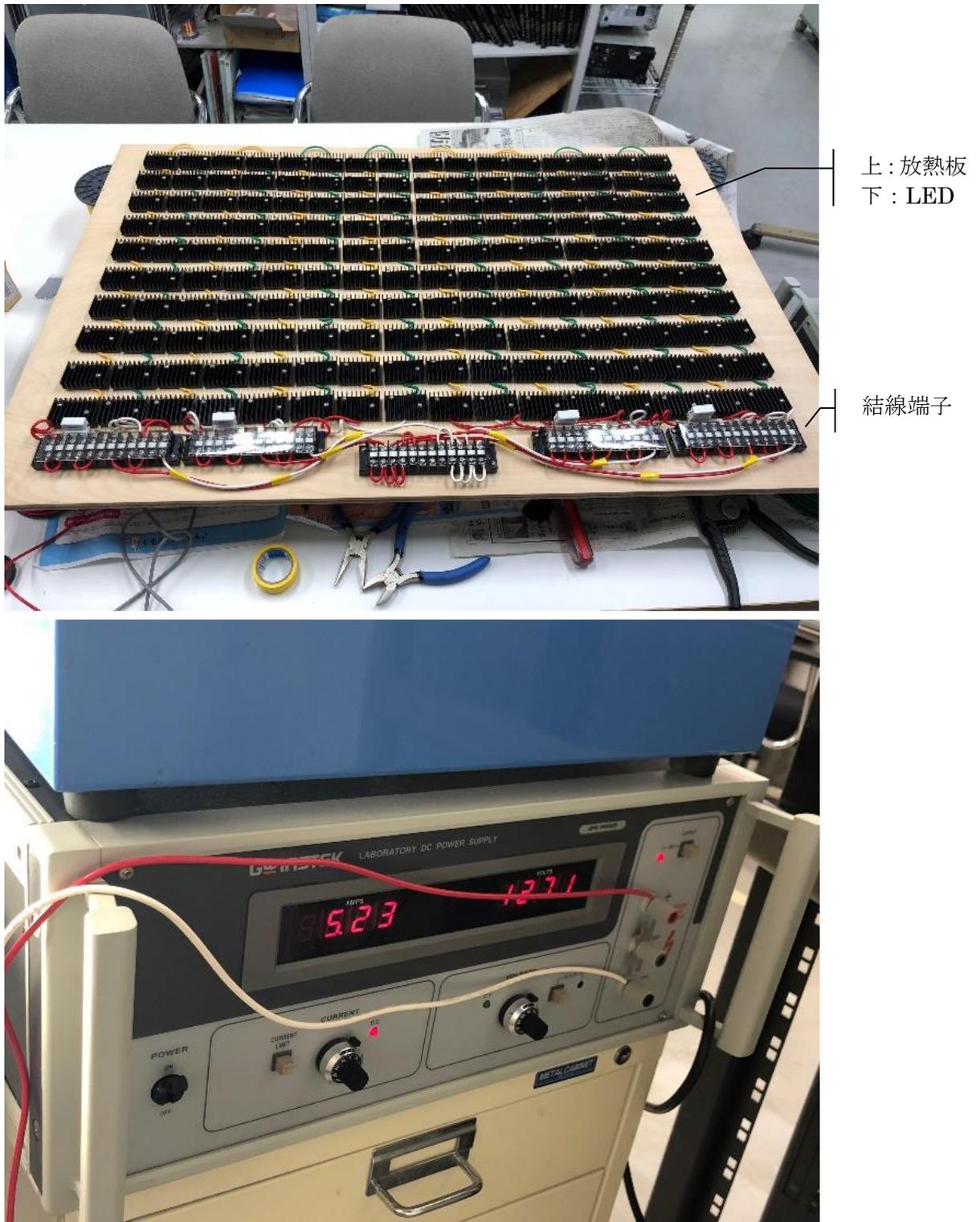


Fig.F2-14 光源と電源 (メータに電流 (左)・電圧 (右) を表す)



Fig.F2-15 光源動作時の様子

### F2.3.5 自作した光源での実験結果

分断化しないブリッジなしの通常アレイ回路と二分の一分断法（ループなし）でのアレイ回路の比較である。アレイ回路は2S4Pの構成である。使用している太陽電池モジュールの特性をTable.F2-10にまとめる。

Table.F2-10 使用している太陽電池モジュールの公称定格

製造会社	株式会社 K・I・S
型番	GT833S-TF
公称最大出力	7 [W]
公称最大出力動作電流	0.41 [A]
公称最大出力動作電圧	17.2 [V]
公称短絡電流	0.45 [A]
公称開放電圧	21.1 [V]

実験方法として、電子負荷装置で負荷抵抗を調整することにより、アレイ回路の出力電圧が自由自在に設定できる。その範囲は20~40 [V]である。光源から太陽電池モジュールの距離が40 [cm]である。採取したデータでI-VカーブとP-Vカーブを描く。更に、光源電流の変化でそれぞれのI-VとP-VカーブをFig.F2-

15～Fig.F2-18 に示す通りに描いた。

光源には四列の LED 電球のストリングが並列接続している。各ストリングの電流は図のタイトルに示す電流である。自作 LED 光源の総電流はタイトルの電流の四倍である。

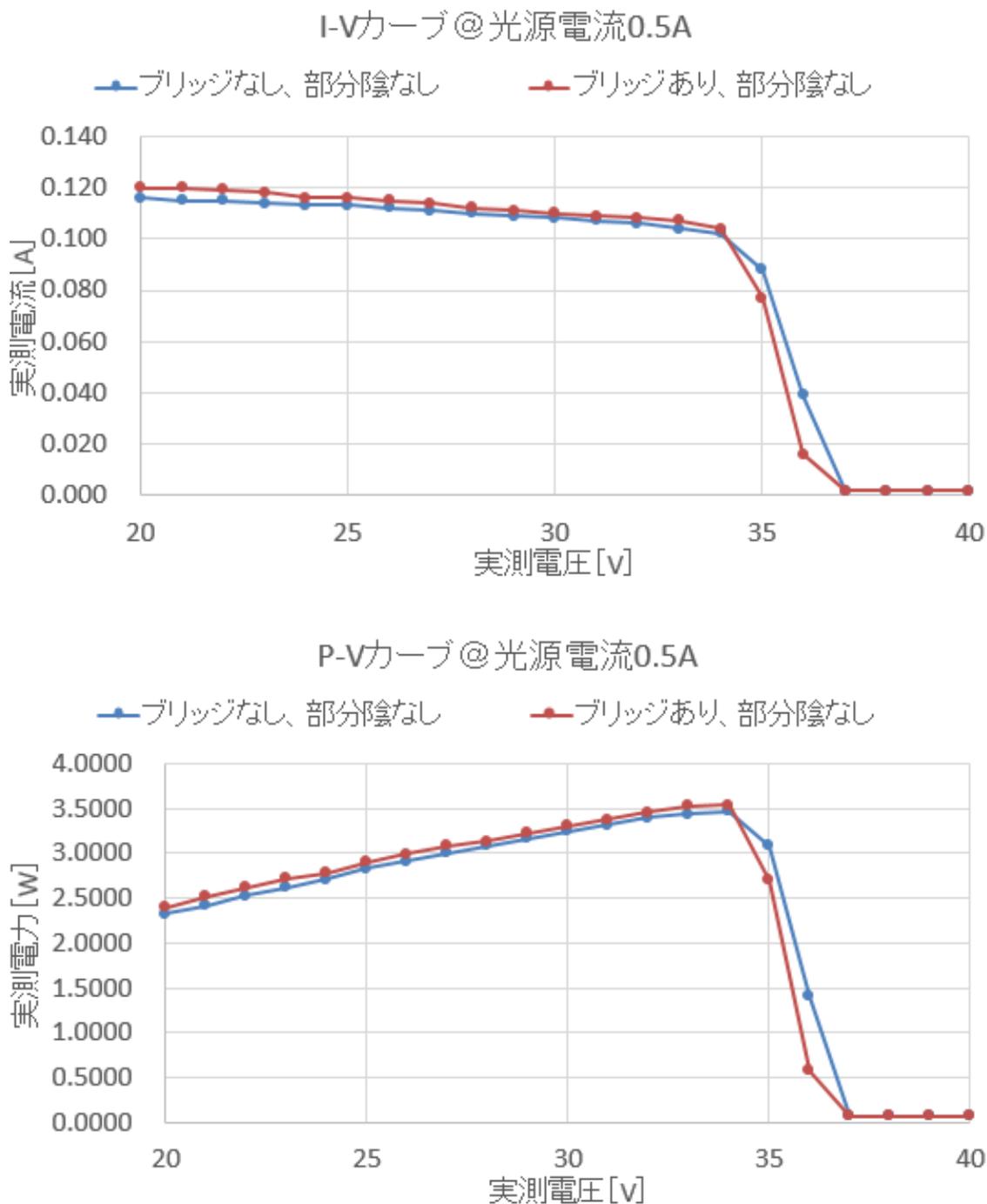


Fig.F2-16 光源ストリング電流 0.5 [A]での I-V と P-V カーブ

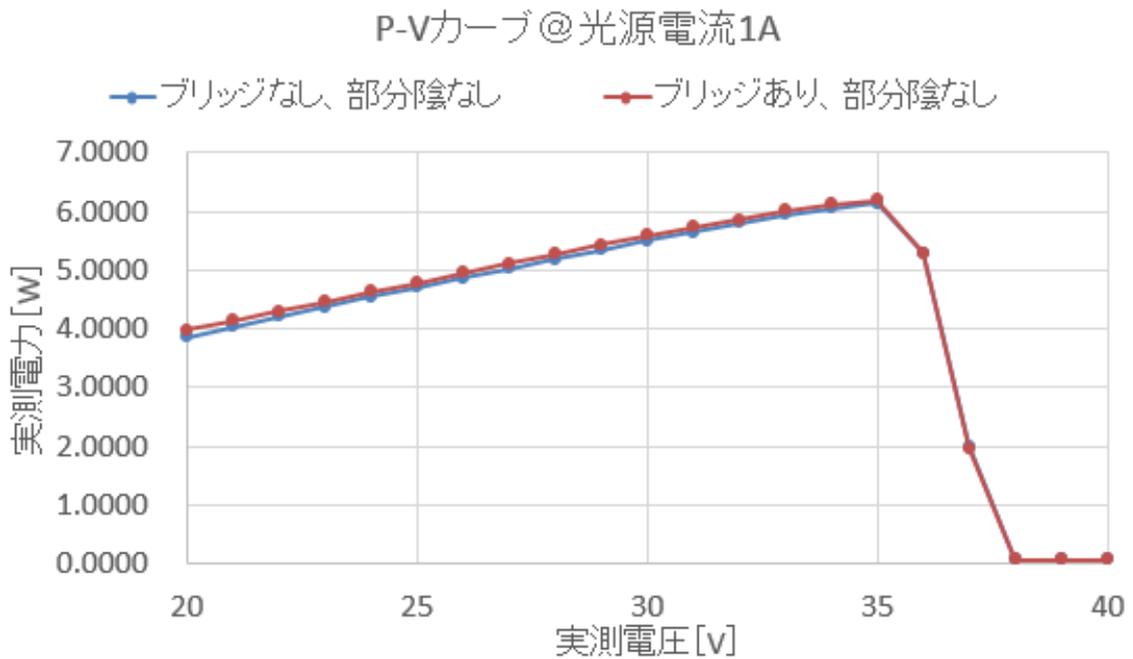
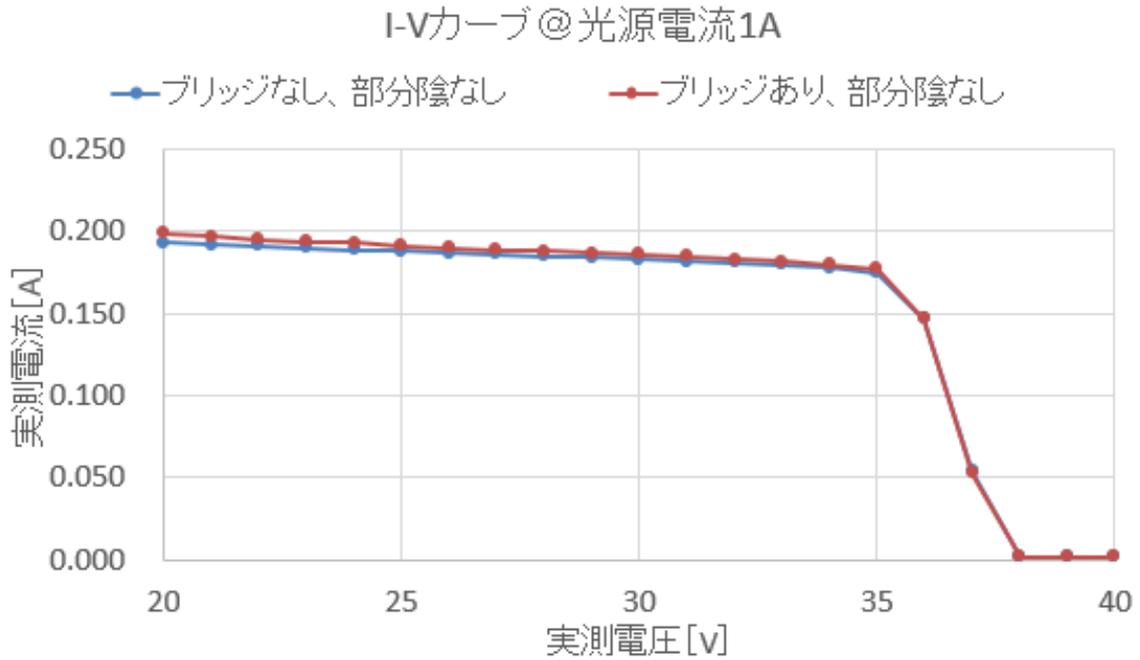


Fig.F2-17 光源ストリング電流 1.0 [A]での I-V と P-V カーブ

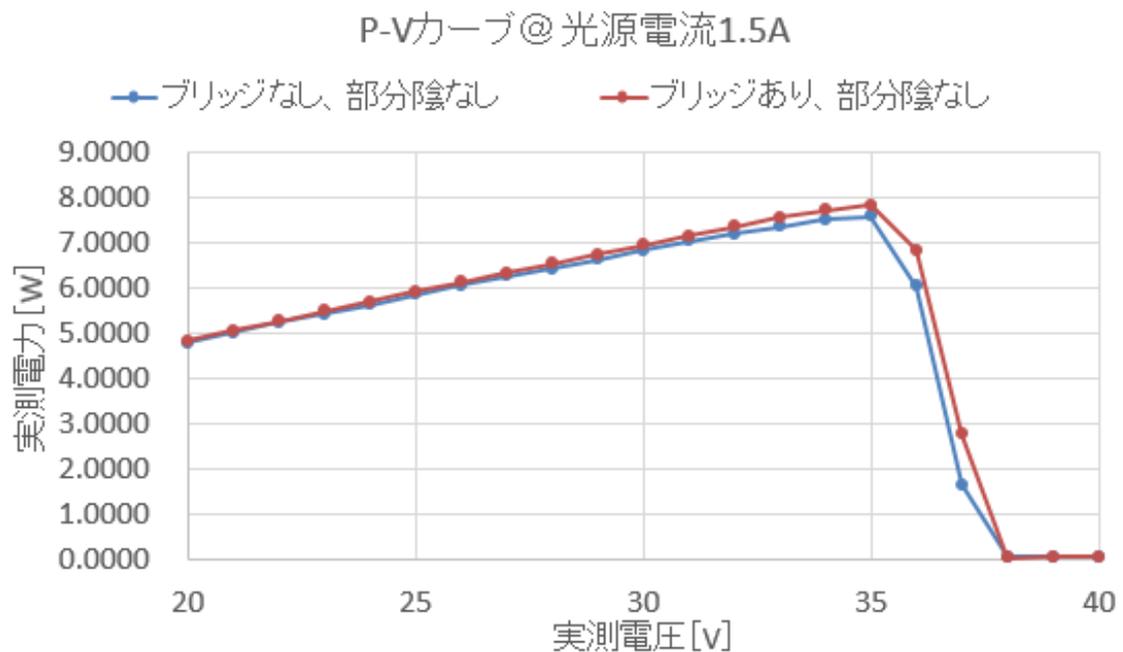
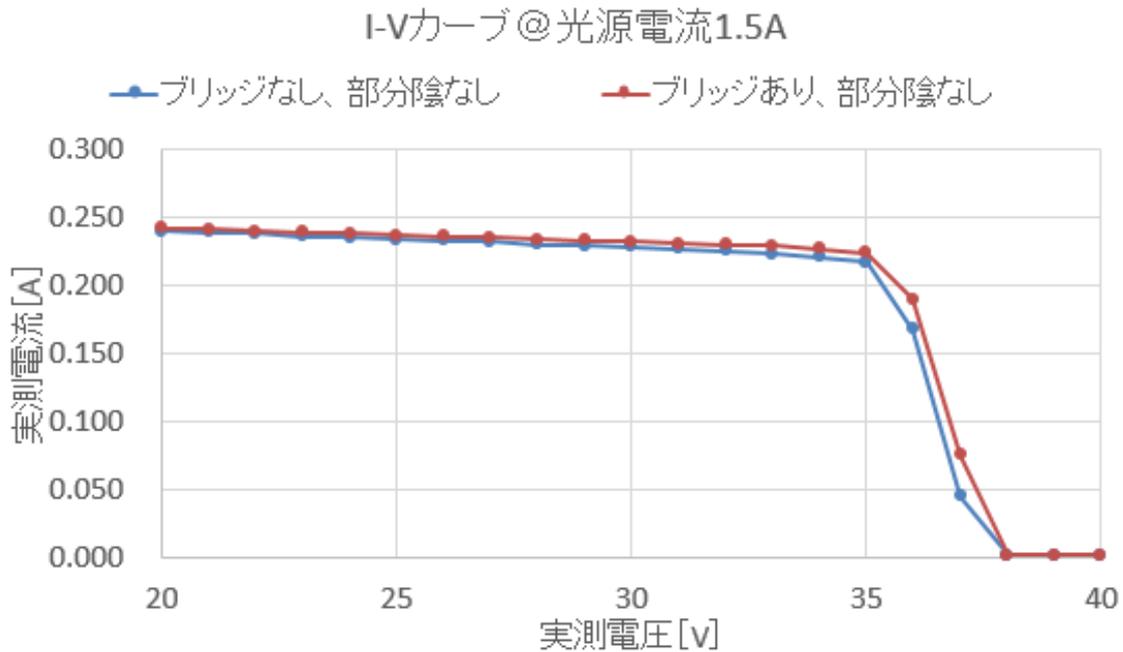


Fig.F2-18 光源ストリング電流 1.5 [A]での I-V と P-V カーブ

結果より、P-V カーブ特有の様子が現れた。特にアレイ回路の分断化の有無に関わらず、ほぼ同じ電力出力ができた。この光源と用いて室内でも太陽電圧アレイ回路の実験が行われる。

### F2.3.6 部分陰の作り方

本研究で部分陰の定義は太陽電池アレイ回路の周りにある簡単に取り除けな

い障害物での周期性を有する陰である。

仕組みとして、陰にかかる場所では直射日射が障害物に阻まれ、散乱日射しかその場に到達できないことである。

簡単に取り除けないとは、その障害物を太陽電池モジュールに載せる積雪やくっつくゴミ・汚れによる照度の低減と区別する。なぜなら、前者は他人の所有地にある木・建物であり、取り除くのは他人の同意や許可、あるいは裁判が発生する可能性がある。ただし、後者は定期的な清掃で取り除くことができるから。

背景にある実験内容により、直達日射を遮断し、散乱日射のみの放射照度が全天日射量の 15% であるとわかった。例え  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  の全天日射の場合に、散乱日射が約  $150 \text{ [W/m}^2\text{]}$  である。しかし今回の LED 光源の放射照度は  $300\sim 400 \text{ [W/m}^2\text{]}$  しか出力できないので、15% で発生させる陰の放射照度  $45\sim 60 \text{ [W/m}^2\text{]}$  である。正直言うとこれは写真暗室のような場所にある放射照度である。すると光を完全に遮断したほうが良いと考える。この LED 光源で部分陰を作る手法は光源の照度を一定し、6 枚の A4 コピー用紙（白）を重ねて太陽電池モジュールに置くことである。

## 付録 第3章

# 放射照度の低下とブリッジ電流

第2章に本論文が扱う部分陰を定義した。それは直射日射が遮蔽され、散乱日射のみ太陽電池アレイ回路の一部を照らす場合とした。定量的に散乱日射は全天日射の放射照度の15%まで低下した。本章では他種類の部分陰を検討する。更にそれらの部分陰がブリッジ電流へ及ぼす影響を議論する。

## F3.1 陰を生じるもの

### F3.1.1 背が高い障害物の陰

この陰は第2章に検討した太陽電池アレイ回路の周りの簡単に取り除けない障害物によって生じる周期性を有する陰である。この陰のかかる場所に到着できる光は散乱日射のみで、測定実験での結果より全天日射の放射照度の15%程度である。

この陰を生じるものは木・建造物・電柱等と想定されるが、これらは所有権の問題などで簡単に取り除くことができない。周期性を有するのは一日の時間による太陽高度と軌跡との関係で一定の時間帯に発生するためである。

従って、この陰によって生じる影響は技術的な手段でのみ解決可能と考え、本論文の本文ではその解決策を論じた。

### F3.1.2 太陽電池モジュールに付着する物での陰

このタイプの陰を生じるのは太陽電池モジュールに付着する塵・鳥の糞・落ち葉・積雪等である。塵や鳥の糞はモジュールのガラスに薄く付着すると、ガラスの透過率が減少する。一方、落ち葉と積雪はモジュールの表面に積載し、ガラスの透過率をほぼ0にする。ちなみに透過率1の場合の具体例はきれいなモジュール表面である。

付着物の陰は定期的に太陽電池モジュールを掃除すれば解決できるので、本論文ではこのタイプの陰は検討外にした。この付録では異なる透過率で発生する部分陰がどんな影響を太陽光発電システムに与えるのかを少々議論する。

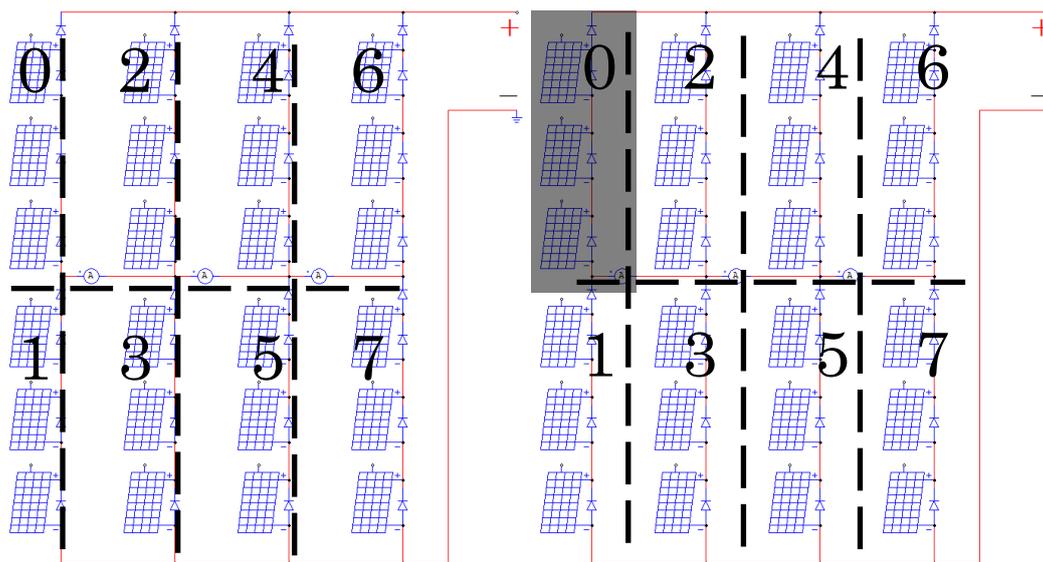
## F3.2 異なる透過率とブリッジ電流

本論文では分断化手法及びブリッジ電流に関する検討はシミュレーション解析ソフトウェアで行った。その条件の一つである部分陰の定義は通常状態の放射照度を15%まで低下させることである。しかし、実際の部分陰による放射照度の低下可能な範囲は0~99%であるので、本節では異なる低下程度の部分陰をシミュレーション解析し、本文に述べたシステムが上手く運用できるかを検討する。

本章では「透過率」と「低下程度」という文言を使い、それらは同じ意味を有すると考える。例えば「透過率60%」とは「元の放射照度の60%まで低下する」という意味である。本節で検討する透過率は $1 \cdot 0.9 \cdot 0.6 \cdot 0.3 \cdot 0.15$ である。それぞれの低下程度は「無低下」・「90%まで低下」・「60%まで低下」・

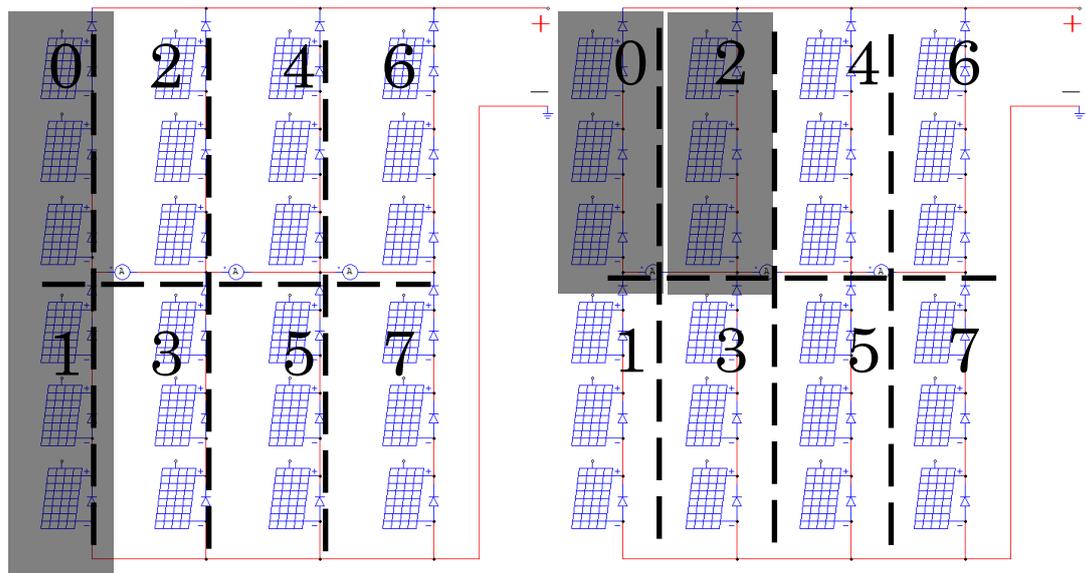
「30%まで低下」・「15%まで低下」である。その中に「透過率0.15（15%まで低下）」は本論文の本文で使った数値である。放射照度は $1000 \text{ [W/m}^2\text{]} \cdot 300 \text{ [W/m}^2\text{]} \cdot 150 \text{ [W/m}^2\text{]}$ で、太陽電池モジュールの表面温度を $0 \text{ [}^\circ\text{C]}$ と設定する。検討要項は出力電力の低下程度（最大点で）・多峰性及びブリッジ電流様子である。これで本文に検討された各内容の汎用性を論じる。

なお、部分陰の発生法は以下のようにする：



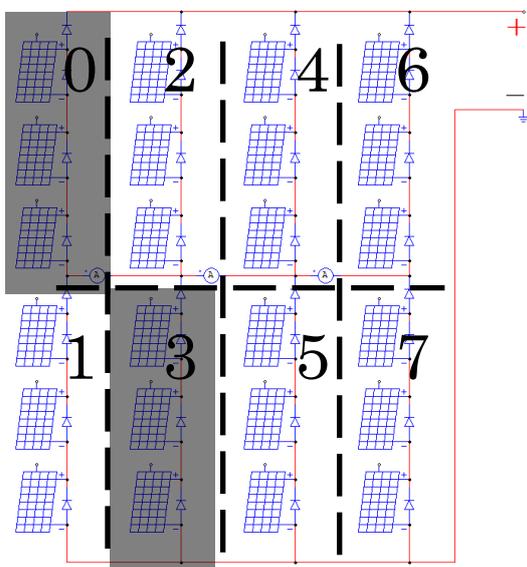
(a) 部分陰なし

(b) 一位陰0



(c) 二位陰 01

(d) 二位陰 02



(e) 二位陰 03

Fig.F3-1 部分陰の発生手法

### F3.2.1 分断化なし太陽電池アレイ回路

分断化なしの太陽電池アレイ回路には短絡ブリッジが存在しないため、ブリッジ電流も存在しない。出力電力の低下程度（最大点で）と多峰性を検討する。各データを Table.F3-1 にまとめた。

Table.F3-1 異なる透過率による部分陰の影響（分断化なし）

No.	透過率	部分陰	Irr. [W/m <sup>2</sup> ]	Temp. [°C]	Peak No.	Vsys [V]	Isys [A]	Syspower [W]
1	1	部分陰なし	1000	0	1	253.80	19.12	4851.40
2	0.9	部分陰0	1000	0	1	255.60	18.14	4637.37
3	0.9	部分陰01	1000	0	1	253.50	18.57	4708.40
4	0.9	部分陰02	1000	0	1	257.70	17.19	4430.05
5	0.9	部分陰03	1000	0	1	257.70	17.19	4430.05
6	0.6	部分陰0	1000	0	1	132.45	18.75	2483.42
7	0.6	部分陰0	1000	0	2	253.80	16.61	4215.06
8	0.6	部分陰01	1000	0	1	252.30	16.99	4285.84
9	0.6	部分陰02	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
10	0.6	部分陰02	1000	0	2	255.45	14.02	3580.80
11	0.6	部分陰03	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
12	0.6	部分陰03	1000	0	2	255.45	14.02	3580.80
13	0.3	部分陰0	1000	0	1	132.45	18.75	2483.42
14	0.3	部分陰0	1000	0	2	252.75	14.99	3789.18
15	0.3	部分陰0	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
16	0.3	部分陰01	1000	0	1	250.35	15.44	3864.16
17	0.3	部分陰01	1000	0	2	134.55	3.37	453.51
18	0.3	部分陰02	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
19	0.3	部分陰02	1000	0	2	253.05	10.77	2725.93
20	0.3	部分陰02	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
21	0.3	部分陰03	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
22	0.3	部分陰03	1000	0	2	253.05	10.77	2725.93
23	0.3	部分陰03	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
24	0.15	部分陰0	1000	0	1	132.45	18.75	2483.42
25	0.15	部分陰0	1000	0	2	252.60	14.41	3639.38
26	0.15	部分陰0	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
27	0.15	部分陰01	1000	0	1	249.75	14.63	3653.94
28	0.15	部分陰01	1000	0	2	134.55	3.37	453.51
29	0.15	部分陰02	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
30	0.15	部分陰02	1000	0	2	252.60	9.61	2426.25
31	0.15	部分陰02	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
32	0.15	部分陰03	1000	0	1	128.10	18.26	2339.36
33	0.15	部分陰03	1000	0	2	252.60	9.61	2426.25
34	0.15	部分陰03	1000	0	3	134.55	3.37	453.51
35	1	部分陰なし	300	0	1	235.65	4.18	984.22
36	0.6	部分陰0	300	0	1	143.55	3.75	538.96
37	0.6	部分陰0	300	0	2	235.35	3.14	739.16
38	0.6	部分陰01	300	0	1	233.55	3.37	787.66
39	0.6	部分陰02	300	0	1	136.35	3.38	460.60
40	0.6	部分陰02	300	0	2	235.35	2.09	492.78
41	0.6	部分陰03	300	0	1	136.65	3.37	460.34
42	0.6	部分陰03	300	0	2	235.35	2.09	492.78
43	1	部分陰なし	150	0	1	220.95	0.97	213.74

No.1・35・43 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 1 の場合（汚れ等がなし）かつ部分陰がなしに P-V カーブのピーク値である。他の透過率のピーク値の比較目安とする。

No.2~5 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.9 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 91%~96%まで低下することがわかった。この結果は本文第 4 章の 77%（一位陰）・55%（二位陰）までの程度より電力が多めに取れることが判った。いわゆるモジュールの表面には少量の塵等が付着しても、出力電力に対する影響が軽いと考えられる。

なお、こういう高い透過率では多峰性が確認しなかった。

No.6~12 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.6 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 88%（一位陰）・74%（二位陰）まで下げ、本文第 4 章の 77%（一位陰）・55%（二位陰）より少々多めに電力が取れたことがわかった。

No.6/7・No.9/10・No.11/12 では多峰性を示す複数の電力ピーク値も確認された。

No.13~23 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.3 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 79%（一位陰）・56%（二位陰）まで下げ、本文第 4 章の 77%（一位陰）・55%（二位陰）の同様程度に低下することがわかった。

No.13~15・No.16/17・No.18~20・No.21~23 では多峰性を示す複数の電力ピーク値も確認された。

No.24~34 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.15 の部分陰がかかる場合のデータである。これは本文で用いている部分陰である。

No.24~26・No.27/28・No.29~31・No.32~34 では多峰性を示す複数の電力ピーク値も確認された。

No.36~42 :

放射照度 300[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.6 の部分陰がかかる場合のデータである。No.35 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.35 の 80%（一位

陰)・50% (二位陰) まで下げ、本文第4章の77% (一位陰)・55% (二位陰) の同様程度に低下することがわかった。

多峰性を示す複数の電力ピーク値もわかった。一般的に放射照度が300[W/m<sup>2</sup>]以下の場合には直射日射がほぼなくなると想定できるため、そのデータは散乱日射のみでの結果と考える。この状況で太陽電池アレイ回路の全体的な出力電力が少ないので、部分陰の有無による出力電力への影響が小さいと考えられる。

結論として、部分陰の透過率が0.9以上の場合に出力電力への影響が少なく、透過率が下がりながら、出力電力への影響が大きくなることがわかった。ただし、その影響は一定の程度までで、透過率との比例関係はないと考える。一方、放射照度が低くなると、太陽電池アレイ回路の出力電力が大幅に低減し、部分陰での影響が著しくなくなった。

### F3.2.2 二分の一分断法 (循環ループあり) の太陽電池アレイ回路

二分の一分断法 (循環ループあり) の太陽電池アレイ回路には短絡ブリッジが存在するため、ブリッジ電流も存在する。本項では出力電力の低下程度 (最大点で)・電力の多峰性及びブリッジ電流の様子を検討する。各透過率の部分陰でのブリッジ電流と本文第4章に検討する電流の様子と比較し、その章に検討したブリッジ電流の利用法が使用できるかを検討する。同時に多峰性に関して、本文の第4章ではブリッジがあると、部分陰03の出力電力が向上できるという結論に至った。本項でそれを新たな条件で検討する。各データをTable.F3-2にまとめた。

Table.F3-1より、Table.F3-2にはブリッジ電流を表記するA12・A23・A34・A41が新たに追加した。A41は循環ループのブリッジ電流である。

Table.F3-2 異なる透過率による部分陰の影響 (分断化あり)

No.	透過率	部分陰	Irr. [W/m <sup>2</sup> ]	Temp [°C]	Peak No.	Vsys [V]	Isys [A]	Syspower [W]	A12 [A]	A23 [A]	A34 [A]	A41 [A]
1	1	部分陰なし	1000	0	1	252.10	19.20	4840.99	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.9	部分陰0	1000	0	5	256.90	17.60	4520.40	0.2105	0.0702	-0.0702	-0.2105
3	0.9	部分陰01	1000	0	1	251.80	18.67	4699.78	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.9	部分陰02	1000	0	5	260.20	16.61	4321.20	0.0000	0.2805	0.0000	-0.2805
5	0.9	部分陰03	1000	0	1	251.80	18.67	4699.78	0.4205	-0.1402	-0.1402	-0.1402
6	0.6	部分陰0	1000	0	15	180.10	17.12	3083.59	0.8430	0.2810	-0.2810	-0.8430
7	0.6	部分陰0	1000	0	19	260.80	15.49	4040.90	0.8418	0.2806	-0.2806	-0.8418
8	0.6	部分陰01	1000	0	2	250.90	17.05	4277.17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.6	部分陰02	1000	0	1	128.80	16.92	2179.22	0.0000	1.1240	0.0000	-1.1240
10	0.6	部分陰02	1000	0	7	261.70	13.29	3477.68	0.0000	1.1226	0.0000	-1.1226
11	0.6	部分陰03	1000	0	2	250.90	17.05	4277.17	1.6822	-0.5607	-0.5607	-0.5607
12	0.3	部分陰0	1000	0	1	134.80	17.09	2303.08	1.4753	0.4918	-0.4918	-1.4753
13	0.3	部分陰0	1000	0	6	261.40	13.85	3619.66	1.4734	0.4911	-0.4911	-1.4734

14	0.3	部分陰01	1000	0	2	249.70	15.44	3856.29	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15	0.3	部分陰02	1000	0	1	123.10	17.28	2127.55	0.0245	1.4180	-0.0080	-1.4344
16	0.3	部分陰02	1000	0	7	261.70	10.01	2618.81	0.0000	1.9653	0.0000	-1.9653
17	0.3	部分陰03	1000	0	2	249.70	15.44	3856.29	2.9446	-0.9815	-0.9815	-0.9815
18	0.15	部分陰0	1000	0	1	128.20	16.82	2156.49	1.7914	0.5971	-0.5971	-1.7914
19	0.15	部分陰0	1000	0	5	262.60	13.27	3485.50	1.6592	0.5531	-0.5531	-1.6592
20	0.15	部分陰01	1000	0	2	249.10	14.64	3646.52	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
21	0.15	部分陰02	1000	0	1	123.10	17.28	2127.55	0.0263	1.2062	-0.0088	-1.2237
22	0.15	部分陰02	1000	0	6	264.70	8.84	2341.09	0.0000	2.2111	0.0000	-2.2111
23	0.15	部分陰03	1000	0	2	249.10	14.64	3646.52	3.5760	-1.1920	-1.1920	-1.1920
24	1	部分陰なし	300	0	4	235.30	4.18	983.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25	0.6	部分陰0	300	0	4	209.50	3.85	805.75	0.2529	0.0843	-0.0843	-0.2529
26	0.6	部分陰01	300	0	4	233.20	3.54	825.44	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27	0.6	部分陰02	300	0	3	181.90	3.54	643.04	0.0000	0.3372	0.0000	-0.3372
28	0.6	部分陰02	300	0	4	245.80	1.19	292.10	0.0000	0.2971	0.0000	-0.2971
29	0.6	部分陰03	300	0	4	233.20	3.54	825.44	0.5055	-0.1685	-0.1685	-0.1685
30	1	部分陰なし	150	0	14	219.70	0.97	213.29	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

#### No.1・24・30 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 1 の場合（汚れ等がなし）かつ部分陰がなしに P-V カーブのピーク値である。他の透過率のピーク値の比較目安とする。

#### No.2~5 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.9 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 89%~97%まで下がり、本文第 4 章の 77%（一位陰）・55%（二位陰）より多めに電力が取れたことがわかった。すなわちモジュールの表面に少量な塵等が付着しても、出力電力に対する影響は軽いと考えられる。

こういう高い透過率では多峰性が確認しなかった。

ブリッジ電流について、No.18~23 は本文に用いた透過率 0.15 のデータと比較すると、電流量が減少した一方、方向は同じであることが判った。すると、部分陰の位置判定用のしきい値を細かく設定したら、このような高い透過率でも部分陰の位置判定ができると考える。なお、二位陰 03 の出力電力は Fig.F3-1 にまとめる同様な状況の電力より大幅に上昇することが確認できた。これは分断化回路の優れた点である。

#### No.6~11 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.6 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 88%（一位陰）・72%（二位陰）まで下がり、本文第 4 章の 77%（一位陰）・55%（二位陰）と少々多めに電力が取れることがわかった。

No.6/7・No.9/10 では多峰性を示す複数の電力ピーク値を確認した。

ブリッジ電流について、No.18～23 は本文に用いた透過率 0.15 のデータと比較すると、電流量が減少した一方、方向は同じであることが判った。すると、部分陰の位置判定用のしきい値を細かく設定したら、このような高い透過率でも部分陰の位置判定ができると考える。

No.12～17 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.3 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 79% (一位陰)・54% (二位陰) まで下げ、本文第 4 章の 77% (一位陰)・55% (二位陰) の同様程度に低下することがわかった。

No.12/13・No.15/16 では多峰性を示す複数の電力ピーク値を確認した。

ブリッジ電流について、No.18～23 は本文に用いた透過率 0.15 のデータと比較すると、電流量が減少した一方、方向は同じであることが判った。

No.18～23 :

放射照度 1000[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.15 の部分陰がかかる場合のデータである。これは本文に用いる部分陰である。No.18/19・No.21/22 では多峰性を示す複数の電力ピーク値を確認した。

No.25～29 :

放射照度 300[W/m<sup>2</sup>]・透過率 0.6 の部分陰がかかる場合のデータである。No.1 と比較すると太陽電池アレイ回路の出力電力が No.1 の 83% (一位陰)・65% (二位陰) まで下がり、本文第 4 章の 77% (一位陰) と同様程度に低下するが、二位陰の場合に 10%程度上昇することがわかった。

No.27/28 でのみ、多峰性を示す複数の電力ピーク値を確認した。

ブリッジ電流について、No.18～23 は本文に用いた透過率 0.15 のデータと比較すると、電流量が減少した一方、方向は同じであることが判った。一般的に放射照度が 300[W/m<sup>2</sup>]以下の場合には直射日射がほぼなくなると想定できるため、そのデータは散乱日射のみでの結果と考える。いわゆる、この状況で部分陰の有無による出力電力への影響が小さいと考えられる。

結論として、透過率が 0.9 以上の場合に部分陰での影響が少なく、透過率が下がりながら、出力電力への影響が大きくなることがわかった。ただし、その影響が一定の程度までで、透過率との比例関係がないと考える。一方、放射照度が低くなると、太陽電池アレイ回路の出力電力が大幅に低減し、部分陰での影響が目立たなくなった。なお、ブリッジの追加によって、部分陰 03 の影響が大幅に削減できた。これは分断化回路の利点である。

### F3.2.3 結論

透過率が 0.9 以上の場合には部分陰での影響が少なく、透過率が下がると、部分陰の影響が大きくなることがわかった。ただし、その影響は一定の程度までで、透過率との比例関係はないと考える。放射照度が低くなると、太陽電池アレイ回路の出力電力が大幅に低減し、部分陰での影響が著しくなかった。

ブリッジの有無により、部分陰に影響される太陽電池アレイ回路の出力電力が変化する。P-V カーブの多峰性については、ブリッジがあっても少し生じる。ただし、Table.F3-2 のデータ数は Table.F3-1 より少なくなったので、分断化した回路は多峰性の発生頻度を削減することができたと考える。特に部分陰 03 のような交差されている部分陰に対して改善効果が著しかった。

透過率が 0.15～0.9 を検討した結果として、ブリッジ電流が確認された。透過率の変化により、単純に電流量のみが変化したがる、方向と発生する場所が変わらなかった。よって、本文に述べた部分陰の位置判定法は異なる透過率を有する部分陰にも適用できると考える。

# 参考文献

## 第1章 序論

- [1-1] 四川省发展和改革委员会:「四川省发展和改革委员会 关于贯彻国家2020 年光伏发电上网电价政策有关事项的通知」, 川发改价格[2020]369号, URL:  
<http://fgw.sc.gov.cn/sfgw/jgtzgg/2020/7/15/d50ed321cda6448cbb74ce62c319ba04.shtml>

## 第2章 背景

- [2-1] 太陽光発電協会(平成 27 年)『太陽光発電システムの設計と施工 (改訂 5 版)』オーム社 pp.3-5
- [2-2] 太陽光発電協会(2013-4)『公共・専用太陽光発電システム手引書』p.6
- [2-3] 消防研究センター(2014-3)『太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策』 p.1
- [2-4] 太陽光発電協会(平成 27 年)『太陽光発電システムの設計と施工 (改訂 5 版)』オーム社 p.2
- [2-5] N. Femia et al.: “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, in IEEE Transactions on Power Electronics 2005, Vol.20, pp. 963-973 (2005)
- [2-6] M. Lokanadham, K. Vijaya Bhaskar: “Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System” in IJERA2012, Vol.2, pp. 1420-1424 (2012)
- [2-7] K. Itako, Introduction to Photovoltaic Power Conditioning system, pp.31-33, OHMsha, Tokyo (2014) (In Japanese)  
板子一隆:「太陽光発電システムのパワーコンディショナ入門」, オーム社, pp.31-33 (2014)
- [2-8] R. Faranda and S.Leva: “Energy comparison of MPPT techniques for PV systems”, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, Issue 6, Vol.3, pp.446-455 (2008)
- [2-9] Powersim (2011) 『PSIM User Guide Version 9.0』 pp. 180-181
- [2-10] 太陽光発電協会(平成 27 年)『太陽光発電システムの設計と施工 (改訂 5 版)』オーム社 pp.36-37

- [2-11] 太陽光発電協会(2013-4)『公共・専業用太陽光発電システム手引書』  
p.15
- [2-12] 太陽光発電協会(平成 27 年)『太陽光発電システムの設計と施工 (改訂 5 版)』オーム社 p.60
- [2-13] 気象庁『日射・赤外放射について よくある質問』  
[https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/radiation/faq\\_rad.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/radiation/faq_rad.html)
- [2-14] 消防研究センター:”太陽光発電システム火災と消防活動における安全対策”, pp.5~7(2014-3)
- [2-15] NEDO:”平成 26 年度太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト”
- [2-16] N. Femia et al.: “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method”, in IEEE Transactions on Power Electronics 2005, Vol.20, pp. 963-973 (2005)
- [2-17] M. Lokanadham, K. Vijaya Bhaskar: “Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System” in IJERA2012, Vol.2, pp. 1420-1424 (2012)
- [2-18] K. Itako, Introduction to Photovoltaic Power Conditioning system, pp.31-33, OHMsha, Tokyo (2014) (In Japanese)  
板子一隆:「太陽光発電システムのパワーコンディショナ入門」, オーム社, pp.31-33 (2014)
- [2-19] R. Faranda and S.Leva: “Energy comparison of MPPT techniques for PV systems”, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, Issue 6, Vol.3, pp.446-455 (2008)
- [2-20] M. Sheraz and M.A.Abido: “An Efficient Fuzzy Logic Based Maximum Point Tracking Controller for Photovoltaic Systems”, RE&PQJ, Vol.1, No.11, pp.146-151 (2013)
- [2-21] Mohamed A.El-sayed and Steven Leeb: “Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Using Boost Converter for Solar Photovoltaic System in Kuwait”, RE&PQJ, Vol,1, No.13, pp.13-18 (2015)
- [2-22] J. Aymen et al.: “Comparison of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Controllers for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Modules”, RE&PQJ, Vol.1, No.14, pp.796-800 (2016)
- [2-23] A. Al Nabulsi and R. Dhaouadi: “Fuzzy Logic Controller Based Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking”, RE&PQJ, Vol.1, No.10, pp.1150-1155 (2012)

- [2-24] T. Senjyu et al: “Maximum Power Point Tracking Control of Photovoltaic Array under Partial Shading Conditions”, in IEEJ Trans.PE, Vol.119, No.12, pp.1331-1338 (1999-12) (in Japanese)  
千住智信・他:「太陽電池の部分的陰を考慮した最大出力点追従制御」, 電学論 B, Vol.119, No.12, pp.1331-1338(1999-12)
- [2-25] N. D. Kaushika et al, “Energy Yield Simulations of Interconnected Solar PV Arrays”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.18, No.1, pp.127-134 (2003-3)
- [2-26] Y. Wang et al: “Architecture and Control Algorithms for Combating Partial Shading in Photovoltaic Systems”, IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol.33, No.6, pp.917-930 (2014-6)
- [2-27] M. Tanemo et al: “Evaluation of Photovoltaic Generation System Using Series/Parallel Switching Circuits with Power MOSFETs”, The H29 annual Meeting Record of I.E.E. Japan, No.4, pp.332-333 (2017-3) (in Japanese)  
種茂真道・野村新一:「パワーMOSFETを用いた太陽電池モジュールの直並列切り替え回路の評価」, 平成29年電気学会全国大会講演論文集, 第四分冊, pp.332-333 (2017-3)
- [2-28] M. Z. Shams El-Dein et al: “Optimal Photovoltaic Array Reconfiguration to Reduce Partial Shading Losses”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.4, No.1, pp.145-153 (2012-1)
- [2-29] NEDO:”平成26年度太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト”
- [2-30] Jankowski Martin: “Socket for a solar panel with a protective circuit”, World Patent WO2013026539A1 (2013-2)
- [2-31] Adest Meir et al: “System and method for protection in power installations”, World Patent WO2010065043A1 (2010-10)
- [2-32] Adest Meir et al: “Distributed power harvesting systems using DC power sources”, U.S. Patent US20080143188A1 (2007-12)
- [2-33] Schmidt Heribert et al: “Bypass and protection circuit for a solar module and method for controlling a solar module”, World Patent WO2011023732A2 (2011-3)
- [2-34] Gostein Michael et al: “Electrical safety shutoff system and devices for photovoltaic modules”, World Patent

WO2010078303A2 (2010-8)

- [2-35] 李曉楊, 熊野照久:”太陽電池パネル間の直流電圧と電流の遮断装置”, 平成 30 年電気学会全国大会講演論文集, pp.231-232(2018)
- [2-36] 李曉楊, 熊野照久:” 太陽電池パネル間の直流電圧と電流の遮断装置-制御信号の感度についての改良-”, 平成 30 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.299-304(2018)

#### 第 4 章 出力改善に関する研究

- [5-1] 太陽光発電協会:「太陽光発電システムの設計と施工 改訂 5 版」, オーム社, pp.30 (2015)
- [5-2] Powersim : 「PSIM ユーザガイド Version:9.1」, Myway プラス株式会社, p.8 (2011)
- [5-3] What numerical algorithm does PSIM use? from PSIM's HP:  
<https://powersimtech.com/support/resources/faq/q-numerical-algorithm-psim-use/> , Retrieved Jan. 16th, 2017
- [5-4] Powersim, PSIM User Guide Version 9.0, pp.114-118 (2011)

#### 第 5 章 安全性向上に関する研究

- [6-1] アナログ・デバイセズ社:「OP アンプ大全-OP アンプによるフィルター回路の設計」, CQ 出版社, pp.17-24 (2005)
- [6-2] アナログ・デバイセズ社:「OP アンプ大全-OP アンプによるフィルター回路の設計」, CQ 出版社, pp.90-134(2005)
- [6-3] アナログ・デバイセズ社:「OP アンプ大全-OP アンプによるフィルター回路の設計」, CQ 出版社, pp.116-118(2005)
- [6-4] アナログ・デバイセズ社:「OP アンプ大全-OP アンプによるフィルター回路の設計」, CQ 出版社, pp.119-121(2005)
- [6-5] 太陽電池モジュールのデータベース URL: <https://jp.enfsolar.com/>

#### 付録第 1 章 太陽光発電システム各部分の特性

- [F1-1] E. Becquerel (1839). “Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires”. *Comptes Rendus* 9: 561–567.
- [F1-2] R. Williams (1960). “Becquerel Photovoltaic Effect in Binary Compounds”. *The Journal of Chemical Physics* 32 (5): 1505–1514.
- [F1-3] 西村和仁・他:「シリコン結晶薄膜太陽電池の高効率化技術」, シ

ャープ技報, 第 93 号, pp.32-35, 2005 年 12 月

- [F1-4] 財団法人新エネルギー財団:「HIT 太陽電池モジュール」 URL:  
<https://www.nef.or.jp/award/kako/h09/98syo3.htm>
- [F1-5] 北极星太阳能光伏网:「突然爆火的光伏 HIT 是什么黑科技」, URL:  
<http://guangfu.bjx.com.cn/news/20200108/1034732.shtml>
- [F1-6] 京セラ、Sphelar Power:「球状太陽電池 (スフェラー) とは」,  
URL: <http://sphelarpower.jp/technology/>
- [F1-7] 荒川裕則:「色素増感太陽電池<普及版>」 CMC 出版、2007 年
- [F1-8] 吉田郵司:「有機薄膜太陽電池の研究開発」, 産総研 Today,  
Vol.11,No.8, pp.10, 2011 年 8 月
- [F1-9] Akihiro Kojima et al, "Organometal halide Perovskites as  
Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells", J. AM.  
CHEM.SOC. 2009, Vol.131, pp.6050-6051
- [F1-10] K. Horie et al.: "Study on Interrelationship of PV  
Modules-Simulation of Reverse Voltage Taking Account of MPPT  
Control Method in PCS-", in IEEJ Trans.PE, Vol.134, No.8,  
pp.673-681 (2014-8) (in Japanese)  
堀江康介・高橋康人・石原好之・他:「太陽電池モジュールの互換性  
に関する検討—PCS の MPPT 制御方式を考慮した逆電圧発生シミュ  
レーション—」, 電学論 B, Vol.134, No.8, pp.673-681(2014-8)
- [F1-11] Powersim, PSIM User Guide Version 9.0, pp.114-118 (2011)

## 付録第 2 章 数値シミュレーションの精度向上に対する検討

- [F2-1] 「太陽電池パネル設置時の屋上面熱収支の実測とモデルの構築」,  
環境システム研究論文集 Vol.30, pp.271-276, 2002 年 10 月
- [F2-2] 「太陽光発電パネルの熱収支特性の評価に関する研究」, 日本工業  
大学研究報告 Vol.45, No.1, pp.221-224, 2015 年 6 月
- [F2-3] 「気象庁・予報用語: 時に関する用語」, URL:  
[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/toki.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/toki.html)
- [F2-4] Richard W. Thimijan and Royal D. Heins: "Photometric,  
Radiometric, and Quantum Light Units of Measure: A review of  
Procedures for Interconversion", Reprinted from HORTSCIENCE.  
Vol.18, pp.818-820 (1983-12)

# 謝辞

今回の研究を遂行するにあたり、明治大学工学部電気電子生命学科教授の熊野照久先生に前期から 5 年間の懇切丁寧なご指導していただき、深く感謝致します。なお、論文を審査して頂いた電気電子生命学科准教授の野村新一先生と准教授の川崎章司先生に深く感謝を致します。

また研究に関して貴重なご意見を頂戴した同研究室の後輩の皆さま、私生活を支えてくれた家族、友人に深く感謝致します。

2021 年 2 月 15 日

明治大学大学院  
理工学研究科 電気工学専攻  
博士後期課程 李曉楊