論説

Paper

地上用太陽電池効率の理論考察

荒木建次^{*1}, エヌ・ディー・エキンスダウケス^{*2}, 山口真史^{*2}

Analysis on Efficiency Limit of Terrestrial Photovoltaic

Kenji Araki, N. D. Ekins-Daukes, and Masafumi Yamaguchi

Synopsis

Monolithic multi-junction solar cells are constrained in that the current output of the stack is limited to the current being generated in the worst performing cell. This becomes a problem when the spectral content of the radiation incident on the solar cell is different to the 'designed' spectrum. The terrestrial spectrum always changes by different sun height or air mass as well as fluctuation of aerosol density. The annual power generation is expected to be smaller than the designed one, due to the spectrum mismatching. This influence may be emphasized by the increase of the number of junctions, while the efficiency under the designed standard spectrum will be increased with the number of junctions. The annual efficiency of monolithic multi-junction solar cells of more than three junctions were calculated and compared. No distinct advantage with more than 5 junctions in view of annual and daily power generation. The practical efficiency limit in real terrestrial sunshine is a little above 50 %.

1. 緒 言

太陽光発電は、化石燃料の枯渇に備えた代替エネルギー源として、また、地球環境問題の解決に向けたクリーンなエネルギー源として、21 世紀を担うものとして期待されている。しかし、代替エネルギー源としては、さらなる低コスト化が要求されている。太陽光発電システム価格に占める太陽電池用材料およびセルの比重は大きく、この問題は太陽光を集光することにより解決することは可能である^{1),2)}。業務用電力コストあるいは発電原価と競合する低コスト太陽光発電を目指した場合、もともと密度の低いエネルギーを設置面積でカバーするといった太陽光発電の性質上、変換効率を高めないと架台やモジュールの構造材、設置工事費用がコストの相当部分を占めることになり、いくら太陽電池で低コスト化を図ってもシステムとしては依然高額なものになる。セルの高効率化の可能性および最近の研究成果から、どの程度の効率がこういった構成のセルで実現できるかを論ずる。特に、従来論じられていなかった地上太陽光スペクトルの変動が発電効率に与える影響を定量的に論じる。

2. 発電効率理論計算方法
(静的な手法)

太陽電池の場合、良質な結晶と表面不活性化、電極設計がなされた場合、半導体に吸収された光子は 100% 近い効率で電子・正孔対 (キャリア) に変換されて外部にそのキャリア数に対応した電流として取り出すことが可能である。ただし、バンドギャップを下回るエネルギーの光子は吸収されない。

しかしながら、いくら光子の持つエネルギーが高くとも、外部に取り出せる電圧としてはバンドギャップ、より正確には暗電流密度 (材料のバンドギャップと欠陥密度の関数) から決まるダイオード電流が外部負荷に流れる電流とバランスする電圧が外部に取り出せる上限電圧となる。電力は負荷に流れる電流と負荷にかかる電圧との積であるため、太陽電池の理論効率を求める問題は、与えられた太陽光スペクトルから材料の欠陥密度およびバンドギャップを変数とする最適値問題に還元することができる。

定性的には材料のバンドギャップが低いほど電流が稼げるが電圧が下がるといったトレードオフな関係にある。

2004 年 5 月 27 日受付

* 1 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 豊田工業大学受託研究員 (Research & Development Lab., Daido Steel Co., Ltd. Visiting Researcher, Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute)

* 2 豊田工業大学大学院工学研究科、工博 (Dr., Eng., Graduate School of Engineering, Toyota Technological Institute)

そのため、多接合化といったアイデアが古くから提唱されていた。これは、高いバンドギャップ材料で高エネルギー光子を利用し、これに吸収されない低エネルギー光子を低いバンドギャップ材料で電力に変換する方法である。いわば、光子エネルギーをカスケード利用して、高い変換効率を実現するといった発想である。この方法で既に31.5%の高い変換効率（標準条件）が実現されている³⁾。

また、集光照射すれば外部負荷に流れる電流が増大するため、ダイオード電流とバランスする電圧が増大する。出力電流は単純に入射光子数に比例するため、電力としては集光倍率に応じた比例以上に増大することになる。したがって、集光も変換効率を高めるのに有効である。上記多接合技術と組み合わせ、37.4%の高効率が日米で既に実現されている^{4),5)}。

3. 静的な手法による実現可能効率の計算結果

理論効率を求める計算は最適値問題に帰着されるが、実際には材料の制約があるので理論通りの効率が得られるとは限らない。本章で、材料特性による制約を考慮した実現可能効率、および、現状の研究レベルで試作品の効率がどこまで理論効率に肉薄しているかを論じる。

NREL(National Renewable Energy Laboratory)では、集光動作に理想的なバンドギャップを明らかにするため、単一接合太陽電池および多接合太陽電池のモデリングを行った^{6),7)}。次世代超効率太陽電池として、3, 4 接合構造太陽電池の集光動作が考えられる⁸⁾。Kurtzら⁹⁾は、3, 4 接合構造太

陽電池の変換効率に関して数値解析を行っている^{10),11)}。3 接合セルの集光動作に関しては、1.93eV(トップセル)/1.42eV(ミドルセル)/0.95eV(ボトムセル)の組み合わせで、400 倍集光で効率46%が期待できる¹¹⁾。格子不整合系として、GeあるいはGaAs基板上にInGaP(AlGaAs)/GaAs/InGaAs(P)を構成するか、GeあるいはGaAs基板上的InGaP(AlGaAs)/GaAs 2 接合セルとInP基板上的InGaAs(P)セルとの3 接合メカニカルスタックを構成するかであろう。Ge基板上的格子整合系InGaP(AlGaAs)/GaAs/Ge 3 接合セルは、400 倍集光で効率42%¹²⁾が期待できる。

4 接合構造太陽電池の理想効率の4 接合層のバンドギャップ依存性について述べる。理論変換効率は、各々、52.5%である¹²⁾。

今回、計算基準や動作条件がバラバラであった各種接合構成における太陽電池の理論効率を見直し、統一した条件での比較を試みた。結果はTable 1 のようになる。Table 1 にはこれまでに試作された最高効率のセルの効率も合わせて示している。格子整合系の場合、理論効率の90%、格子不整合系の場合、理論効率の80%が実際に到達しているセル効率にほぼ相当する。これを敷衍すると、現在国内外で精力的に研究開発が進められている4接合セルの格子整合系の場合には、47%の効率実現が期待される。

4. スペクトル変動を前提とした多接合太陽電池動作動的モデルおよびその検証

Table 1. Comparison of efficiency among theoretical, achievable and achieved multi-junction solar cells under concentration operation.

Number of Junction	Lattice Matched	Lattice Mismatched	Theoretical Efficiency	Achievable Efficiency	Achieved Efficiency	Achieved / Theoretical
1-J	GaAs		34%	29 ~ 30%	27.8%	81.8%
2-J		1.54eV / 0.94eV	42%	38%		
		(GaAs / GaInAsP)			30.2%	71.9%
		1.4eV / 0.72eV	41%	37%		
		(GaAs / GaSb)			32.8%	80.0%
		GaAs / Si	38.5%	35%	31.0%	80.5%
	1.4eV / 0.72eV		41%	37%		
	(InP / InGaAs)				31.8%	77.6%
	InGaP / GaAs		35%		31.5%	90.0%
3-J		1.93eV / 1.42eV / 0.95eV	46.5%	42%		
		(InGaP / GaAs / InGaAsP)	46.5%	42%	(42%)	(90%)
		InGaP/InGaAs/Ge				
	(Al)InGaP / GaAs / Ge		42%	38%	37.4%	89.0%
4-J	2eV / 1.42eV / 1.05eV / 0.7eV		52.5%	47%	(47.3%)	(90%)
	((Al)InGaP / GaAs / GaInNAs / Ge)					

多接合セルは各々の接合が直列接続されている関係で、各々のセルの発電電流に不一致があると、その内の最も小さい発電電流以上の電流を外部回路に流し得ない。一方、自然の太陽光は基準スペクトルたとえばエアマス 1.5 での全天スペクトル (AM1.5G) と、常に同じとは限らないし、正確に言えば、集光セルの場合青空からの散乱日射を利用できないため、沖縄など低緯度地域の夏至南中といえども、この基準スペクトルに比べ短波長成分が不足する傾向にある。加えて、日射スペクトルはたとえば Fig.1 に示すように季節により、また、時々刻々変動するものである。Fig.1 は北緯 35° の地点で春分に於いて南中から日没までの時角を等分割し、各々の時角においての法線面における直達日射スペクトルを示す。3 接合集光太陽電池を実際に屋外で試験すると、集光、非集光いずれの場合でも日射状況あるいは空の色により日射あたりの短絡電流および効率が 20% 程度の幅で変動することが観測された。具体的には空の色が青くしたがって散乱成分が少ない大気条件では効率および日射あたりの短絡電流が高く、逆に薄雲がかかったりなどして空の色が薄くなると日射あたりの短絡電流や効率も低下した。

単一スペクトル基準を用いた静的な理論効率検討は、単一の基準で比較できるのでセル研究開発にとっては有効であるが、発電量の最大化を目指した装置開発に当たっては必ずしも適切な指針を与えるものではない。したがって、集光式太陽光発電をはじめとして多接合による高効率セルを用いた発電装置の実用化が間近に迫った現状では煩雑ではあるが動的な理論構築に踏み込まざるを得ないと考える。

Fig.1. Daily spectrum change direct normal, clear sky. Each line indicates spectrum of the direct beam sunlight at equal division of time angles from noon to sunset in the equinox on N35 degree of latitude.

実際の太陽光では避けることができないスペクトル変動を前提とした動的な発電効率理論の構築を試みる。

モデルは下記 2 ステップから成り立つ。

1. 直達日射量からスペクトルを予測する。
2. 予測されたスペクトルからセル特性 (短絡電流、効率) を算出する。

1. のスペクトルモデルに関しては経済性 (発電量予測)、および日本の気象条件を考慮したスペクトル規格で議論した内容 (論文等出版済み) と重複するので既出文献を紹介するにとどめる^{2),13),14)}。

スペクトルがマッチングしていない場合、短絡電流が低下し FF (曲線因子) が増大する。この現象は Fig.2 で説明できる。トップセル、ボトムセル、ミドルセル各々の特性を電圧軸に沿って重畳すれば出力のカーブが得られる。しかしながら、スペクトルがマッチングしていない場合、最も短絡電流が少ない接合の短絡電流 (この場合はトップセル) を越えた電流が流れないため、Fig.2 の下図に示すように、最も短絡電流が大きいセル (この場合はボトムセル) の電流が、ボトルネックとなっている接合の短絡電流 (この場合はトップセル) に等しい地点となったところから次の接合のカーブ (この場合はミドルセル) が重畳され、さらに、その電流が再びボトルネックとなっている接合の短絡電流まで下がった地点から次のセル (この場合はトップセル) が重なるというように電圧が合成されるため、最終的には角張ったカーブとなり、FF が増大することになる。定性的な表現では、ミスマッチングがあまり大きくない範囲では過剰電流によりダイオード特性の肩の部分が埋められるため、その分、FF 補償が続くということである。

スペクトル変化が発電特性に与える影響は、厳密には非線形の回路方程式を解かなければならないが、簡便には下記モデルで計算できると考えられる。また、測定結果と照

Fig.2. Superposition of I-V curves of the stack of solar cells with and without presence of current mismatching.

合した結果,この簡便なモデルで十分な精度が得られることが実証された。

大筋の流れとして,下記考え方でスペクトル変動時の短絡電流,FF,効率を求める。

短絡電流:3接合の発電電流の内,最小値を充てる。

効率:直達日射量変動に伴う電圧,および上記短絡電流低下を補正した後,3接合での平均出力電流と3接合の内最大となる電流との比,および,FF最大値とFF最小値との比の小さい方の比を掛け合わせる。ここに,FF最小値はスペクトルが完全にマッチングした時のそれ,FF最大値はスペクトル mismatchingにより上昇しうる最大値のFFを示す。実験上,ある程度以上にスペクトルのマッチングがずれると,FFも飽和するため,これをFF最大値とする。かいつまんでいえば,FF最大値までの範囲内において,過剰電流によりFFが補正されるという考え方である。言い換えれば,最大FFを超えない範囲では過剰電流が尽きるまで, V_{pmax} は引き延ばされるということである。

以下,数式を用いてモデルを説明するが,煩雑になるのを避けるため,数式はトップセルのみ記述する。ミドルセル,ボトムセルでの発電量も同様に計算することができる。短絡電流を求めるにあたり,量子効率から分光効率A/Wに変換する必要がある。この係数は下式で与えられる

$$AA := \frac{1.6021773310^{-19} \cdot \text{coul}}{\left(299792458 \frac{\text{m}}{\text{sec}}\right) \cdot (6.626075510^{-34} \cdot \text{joule} \cdot \text{sec})} \quad (1)$$

$$ph00 := AA \cdot \frac{r_{top}}{r_{top} + r_{middle} + r_{bottom}} \cdot 0.5 \cdot \sum_{k=IndexStart}^{IndexEnd-1} \left(\lambda_k \cdot I_{1.5k} + \lambda_{k+1} \cdot I_{1.5k+1} \right) \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (2)$$

$$phx(x) := AA \cdot 0.5 \cdot \sum_{k=IndexStart}^{IndexStart+x} \left(\lambda_k \cdot I_{1.5k} + \lambda_{k+1} \cdot I_{1.5k+1} \right) \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (3)$$

$$x1 := \sum_{x=0}^{IndexEnd-IndexStart-1} (phx(x) \leq ph00) \quad (4)$$

$$Rad_i := 0.5 \cdot \sum_{k=0}^{Num-2} \left[\left(I_i \right)_k + \left(I_i \right)_{k+1} \right] \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (5)$$

$$Rad_{std} := 0.5 \cdot \sum_{k=0}^{Num-2} \left[\left(I_{1.5} \right)_k + \left(I_{1.5} \right)_{k+1} \right] \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (6)$$

(式1)。

標準スペクトルでのトップセル,ミドルセル,ボトムセルでの発電電流を与え,これに対応する吸収端を求める。ただし,分光感度の窓形状は矩形と想定する。吸収端に相当する波長ベクトルの要素番号は下式で計算できる(式2~4)。積分は計算時間短縮のため,台形公式をそのまま利用した。ここに,下添え字kは波長ベクトルの要素番号,下添え字iは時角の要素番号を示す。 $x1, x2$ はトップセル,ミドルセル,ボトムセルの分光特性を矩形窓になっていると想定したとき,トップセル,ミドルセルの吸収端に対応する波長ベクトルの要素番号を示す。

Indexstartは有効波長データベクトルの開始要素番号,Indexendは有効波長ベクトルの終了要素番号を示す要素番号である。さらに, $r_{top}, r_{middle}, r_{bottom}$ はトップセル,ミドルセル,ボトムセルのAM1.5Gにおける発電電流比を表す。 $I_{1.5}$ はAM1.5Gにおける各波長でのスペクトル密度を示す。 λ は波長である。

標準スペクトル,あるいは任意の時角での有効領域日射強度は下式で表される(式5~6)。Radは有効波長領域での日射強度,RadstdはAM1.5G有効スペクトル領域での日射強度を示す。 I_i はスペクトル強度Iの下添え字iに対応するある時角での分光スペクトル強度を表す。

AM1.5G へのスペクトルマッチングでの発電電流は式 7 で計算できる。発電電流には日射エネルギーは直接関係せず、光子数の積分に比例することに注意されたい。この式を敷衍することにより、任意時角でのトップセル、ミドルセル、ボトムセルでの発電電流量を求めることができる。実際のスペクトルにおける短絡電流は、上記各接合における発電電流の最小値として求められる。

任意時角での開放電圧は下式で補正される(式 8)。Voc0 は標準日射強度における開放電圧、関数 Match(x) は、日射量に比例した理想セルの発電電流を与えるもので、下式により計算される(式 9)。ph はスペクトルマッチングした場合の発電電流である。

任意時角での発電効率は下式で表される(式 10)。min は引数の内、最小の要素を選ぶ関数である。minJ, maxJ はベクトル (ph1, ph2, ph3) の最小要素、最大要素を示す。minJ はスペクトルマッチングしていないときの短絡電流に一致する。FFmatch, FFmax はスペクトルマッチングした時の FF およびスマッチしたときの FF 最大値を示す。

FF 増大量を与える上式を Fig.3 を用いて説明する。Isc

$$ph := AA \cdot \frac{1}{3} \cdot 0.5 \cdot \sum_{k=IndexStart}^{IndexEnd-1} \left(\lambda_k \cdot I_{1.5k} + \lambda_{k+1} \cdot I_{1.5_{k+1}} \right) \cdot (\lambda_{k+1} - \lambda_k) \quad (7)$$

$$Radadj_i := \frac{Voc0 + 3 \cdot 0.027 \cdot \text{volt} \cdot \ln \left(\frac{Rad_i}{100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}} \cdot \frac{\text{Match}(Rad_i)}{\min J_i} \right)}{Voc0} \quad (8)$$

$$\text{Match}(x) := \frac{ph}{100 \frac{\text{mW}}{\text{cm}^2}} \cdot x \quad (9)$$

$$\text{EFFadj}_i := \min \left[\frac{(\text{mean} J_i - \min J_i) \cdot (1 - \text{FFmatch})}{\text{mean} J_i} + 1, \frac{\text{FFmax}}{\text{FFmatch}} \right] \cdot Radadj_i \quad (10)$$

$$V_{pmax1} = Voc - (a1 + a2 + a3) \cdot \min J \quad (11)$$

$$V_{pmax0} = Voc - (a1 + a2 + a3) \cdot \text{mean} J \quad (12)$$

$$V_{pmax} = Voc \cdot \text{FFmatch} \quad (13)$$

$$\frac{V_{pmax1}}{V_{pmax0}} := 1 + \frac{(\text{mean} J - \min J) \cdot (1 - \text{FFmatch})}{\text{mean} J} \quad (14)$$

と I_{pmax} はほぼ等しい、またはスペクトルミスマッチングを起こしても I_{sc}/I_{pmax} の比は変化しないと仮定すると、FF は V_{pmax} の比として表現される(式 11 ~ 13)。したがって、ミスマッチング時、マッチング時に相当する V_{pmax1} と V_{pmax0} との比は式 14 で表現される。これは、FF が上限値を越えない範囲での FF 増大を与える式に一致する。

Fig.3. Approximation of - curves of solar cells for linear calculations.

直達日射の場合、日射スペクトルの変動は Fig.1 に示したように散乱成分の多寡で説明できる。散乱成分が大きくなるにつれ直達日射量が低下するため、直達日射量を説明変数として短絡電流、および効率を目的変数とさせれば、これらは直接観測できる基本的な測定量であるため、実用上便利であるだけでなく、上記大気パラメータの変動の影響を受けにくくなるといった利点もある。ただし、注意を要するのは地球と太陽との距離が季節により変動するため、この関係はある特定の日しか成立しないことである。たとえば、6月における日射強度 850W/m^2 の日射スペクトルは12月における 910W/m^2 と大気散乱の状況、言い換えればスペクトルがほぼ同じ状況である。ちなみに、太陽と地球とが最接近するのは0を起点とする Day Number で3(1月4日)、そのときの日射強度補正係数は1.035、最も離れるのは0を起点とする Day Number にて181(6月2日)で、そのときの日射補正係数は0.967である。この意味で、直達日射量(法線面直達日射量)に加え、法線面全天日射量も利用できる環境にあれば、説明変数を直達日射量とせず、直達成分比(法線面全天日射に対する直達日射量比)とした方が、Day Number に影響を受けない指標となるため、便利かもしれない。

検証には非集光(法線面全天日射を利用)、集光(直達日射を利用)で行った。法線面全天日射を使ったのは、アルベドの分光反射率の影響を避けたためである。非集光での短絡電流モデル計算値と測定値との関係を Fig.4 に、効率のモデル計算値と測定値との関係を Fig.5 に、集光での

Fig.4. Measured and calculated Isc of 3-J solar cell tracking flat-plate operation.

Fig.5. Measured and calculated efficiency of 3-J solar cell tracking flat-plate operation.

集光(直達日射を利用)で行った。法線面全天日射を使ったのは、アルベドの分光反射率の影響を避けたためである。非集光での短絡電流モデル計算値と測定値との関係を Fig.4 に、効率のモデル計算値と測定値との関係を Fig.5 に、集光での

Fig.6. Measured and calculated Isc of 3-J solar cell under 400X concentration operation.

Fig.7. Measured and calculated efficiency of concentrator module (32 receivers connected in series).

に基づき、世界各国で再検討されているスペクトル案の総称であるが、今回は、気象庁観測の国内 14 箇所における大気透過率測定データの月変動データをフィッティングさせて大気パラメータを求めて算出した値を用いて計算を行った。どちらもモデルとよく一致している。

本研究は愛知県内の若手研究者グループであるシラクサ（世界で初めて太陽光集光器を実用化したアルキメデスに敬意を表しその故郷から命名した）に引き継がれ、半導体のモデリングから観測結果のデータベース技術、日射計測およびそのモデル化技術など異分野融合の研究に発展している¹⁵⁾。

5. スペクトル変動を前提とした太陽電池の理論上限効率の再検討

従来、太陽電池では接合数を増やせば増やすほど変換効率が単調に増大するとされてきた。しかしながら、これまで論じたように、理論的にも実験上からもスペクトル変動によるミスマッチングによる損失が顕著に作用すると考えられる。このスペクトル変動に伴う太陽電池動作モデルを敷衍すると、徒に接合数を増大しても年間発電量は増大するとは限らないといった、従来の定説を覆す結論が暗示される。

具体的な計算方法としては、(1) 各々のスペクトルおよび負荷条件での発電量計算を行い、この発電量が最大となる負荷条件を求める、(2) 太陽高度の季節変動、日間変動ごとに变化する最適負荷条件での最大出力を積算する、

(3) 上記積算出力が最大になるようにバンドギャップの組み合わせを最適化するというネストされた動的計画法を使う。計算時間としては、通常の PC (クロック 500MHz) で数日である。

Fig.8 にスペクトル変動を考慮して各接合数の太陽電池における最適設計計算を行い、時々刻々変動するスペクトルのもとでの理論効率上限を算出し、接合数を増した場合、本当に効率が增大するかを検証した結果を示す。スペクトルが変動する地上用太陽電池の場合、5 接合以上接合数を増やしてもメリットがないことが導かれた。その効率理論上限値としては 50% であった。この計算では材料による制約を全く加えておらず、したがって、実現可能な効率としては 3 章で議論した格子不整合系のアナロジーを使うのが適当であろうと考えられる。したがって、年間平均効率で議論した場合、実現可能な値として 40% 程度の効率が見込まれる。この値の多寡については議論が分かれるところであるが、現時点での市販モジュールの最高値が 17.5%¹⁶⁾、年間平均効率としては定格の 65% 程度であることを考えれば、現行品の 3.5 倍の発電量となり、十分に魅力的なターゲットと考える。

Fig.8. Optimized annual efficiency by two calculations classical single spectrum representation vs. calculation by weighted every spectrum.

6. スペクトル変動により制約される理論限界を越えるには

これまで論じたに多接合セルがスペクトル変動に対して発電効率が低下する問題、およびこの問題が接合数の増大につれて顕著になることについては、定量的な研究は著者らが嚆矢となるが、定性的には古くから議論されてきたことである。主に高効率太陽電池の理論を研究しているグループから解決策につながる可能性の提案がいくつかなされている。

豪州のグループからはセルをLEDとして動作させ、光エネルギーに逆変換して過剰電流の伝達を行うことを提唱している。この場合、キルヒフォッフの法則の制約を受けないので、過剰電流をエネルギーとして外部に出力することが可能となる¹⁷⁾。問題は具体的な材料およびセル構造についての提唱がまだできていないことである。

著者らは、スイッチング素子を外付けして過剰電流発生に伴う電圧上昇(接合部の逆バイアス)を検出して過剰電流を外部回路に流して電力として取り出すといった方法を提唱している¹⁸⁾。この方法は低コストで実現容易であるが、残念ながら、現時点では負荷抵抗が低い領域では動作するものの、最大出力地点の負荷条件では電圧損失が発生し、メリットを見出すに至っていない。

本質的な解決にまで至らなくとも、この効果を緩和する方法もある。著者らは、バンドギャップ設計だけでも効率をさほど落とすことなくスペクトル変化に対し頑健で、低緯度地帯から高緯度地帯まで同じバンド設計でカバーできるといった、スイートスポット領域が存在することを発見している¹³⁾。また、活性領域の膜厚を調整することにより、各接合の分光感度にオーバーラップ領域を設けることにより、スペクトル変動に対する頑健度を向上させることができることも数値計算上から見いだしている¹⁹⁾。

7. 結 論

多接合セルの効率につき従来の静的な手法の再見直しを行うとともに、これまでに発表された各種構成のセルの効率実現値と比較した。格子整合系としては理論効率の90%が、格子不整合系としては理論効率の80%が実現されていることを確認した。

太陽光スペクトルが時々刻々また、季節や天候により変化することを考えると、動的なモデルによる効率理論の確立が重要と考えられる。日射モデルおよび日射変動による発電特性をモデル化し、実験と比較した。両者は良く一致し、動的モデルの有効性が確認された。

このモデルを敷衍すると、徒に接合数を増大しても年間発電量は増大するとは限らないといった従来の定説を覆す結論が暗示される。動的計画法を用いて日射変動を前提とした最適バンドギャップの組み合わせを計算した結果、5接合以上では接合数を増やしても年間平均発電効率は増大しないことが見いだされた。動的な理論効率平均値としては50%であり、実現可能な年間発電効率としては40%が見込まれる。

この理論効率限界は、直列回路を構成する接合の外部電流が、最も小さい電流源により制約されるといったキルヒ

フォッフの法則に由来する。したがって、過剰電流を取り出す工夫を施せば静的理論効率に匹敵する年間発電効率を取り出すことが可能であろうと予想されるが、残念ながら現時点では決定打は出ていない。

8. 謝 辞

本研究の一部は、経済産業省のもと、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO 技術開発機構)から委託され、実施したもので関係各位に感謝する。

(文 献)

- 1) M. Yamaguchi, A. Luque: IEEE Trans. Elec. Dev., 46-10 (1999) 2139.
- 2) 荒木建次, 山口真史: 電気製鋼, 71(2000) 303.
- 3) K. Araki, M. Yamaguchi, T. Takamoto, E. Ikeda, T. Agui, H. Kurita, K. Takahashi, T. Unno: Solar Energy Materials & Solar Cells, 69(2001) 559.
- 4) T. Takamoto, T. Agui, K. Kamimura, M. Kaneiwa, M. Imaizumi, S. Matsuda, M. Yamaguchi: Proc. 3rd WCPEC, (2003) 581.
- 5) J. Gordon, Private Communication, (2004)
- 6) S. Ward, M. W. Wanlass, K. A. Emery, T. J. Coutts: Proc. 23rd IEEE PVSC, (1993) 650.
- 7) M. W. Wanlass, T. J. Coutts, J. S. Ward, K. A. Emery, T. A. Gessert, and C. R. Osterwald: Proc. 22nd IEEE PVSC, (1991) 38.
- 8) M. Yamaguchi, T. Takamoto, and S. Wakamatsu: Proc. 2nd WCPEC, (1998) 3524.
- 9) S.R. Kurtz, D. Myers, J.M. Olson: Proc. 26th IEEE PVSC, (1997) 875.
- 10) S.R. Kurtz, P. Faine, J.M. Olson: J. Appl. Phys., 68(1990) 1890.
- 11) I.V. Karpova, S.G. Kalashnikov: International Conf. on Physics of Semiconductors, (1962) 880.
- 12) H.F. MacMillan, B.C. Chung, H.C. Hamaker, N.R. Kaminar, M.S. Kuryla, M. Landle Ristow, D.D. Liu, L.D. Partain, J.C. Schultz, G.F. Virshup, and J.G. Werthen: Solar Cells, 27 (1989) 205.
- 13) M. Yamaguchi, K. Araki: Proc. 29th IEEE PVSC Conf., (2001) 820.
- 14) 平成14年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 太陽光発電技術研究開発 先進太陽電池技

術研究開発 超高効率結晶化合物系太陽電池モジュール
製造技術開発 ,大同特殊鋼 (2003) ,118.

- 15 N. J. Ekins-Daukes, Y. Kemmoku, K. Araki, T. R. Betts, R. Gottshlag, M. Yamaguchi: 第11回「高効率太陽電池および太陽光発電システム」ワ - クシヨップ予稿(2003) ,83.
- 16 <http://www.sharp.co.jp/sunvista/>.
- 17 A. S. Brown, M. A. Green: Proc. 29th IEEE PVSC, (2002) 868.
- 18 N.J. Ekins-Daukes, K. Araki, M. Yamaguchi: Proc. 14th PVSEC, (2003) to be published.
- 19 荒木建次 ,山口真史: 第9回「高効率太陽電池および太陽光発電システム」ワ - クシヨップ予稿(2001)