

持続可能な社会の建設（Ⅲ）

——実効大気透過率——
——メガフロートの建造方法の提案——
——洋上太陽光発電基地——

*草 野 清 信

Construction of a sustainable society (Ⅲ)
- Effective atmosphere transmissivity -
- Proposal of a construction method of Mega-Float -
- Ocean photovoltaic power generation base -

KUSANO Kiyonobu

Abstract

After monthly having calculated amount of theoretical solar radiation in Minami Torishima, effective each month atmosphere transmissivity is derived by comparing the measurement value of the solar radiation with this. The integrated theoretical electric energy for every month by a solar cell (HIP5517 made by SANYO) is calculated using this monthly effective atmosphere transmissivity. Adding up 365 day's electric energy, we get one year's integrated theoretical electric energy. Area of Mega-Float necessary for providing 274 million kW of the total power generation equipment capability of Japan only with a solar cell will be obtained by dividing this value by the above-mentioned integrated theoretical electric energy. We can easily derive this solution as 8802 (km²). Since a passage must be added in consideration of workability, an installation area becomes large and reaches to 12980 (km²).

We propose a method for constituting the Mega-Float of area 12980 (km²) carrying a solar cell by a basic unit of 2 (km²) having a form of equilateral triangle. Since unit itself is huge, this unit is constituted by small 400 subunits which have an area of 5000 (m²) equilateral triangle. The construction cost and the time necessary for completion, are, respectively, approximately 135 trillion yen and approximately 24 years, under the condition of adopting this proposed method, and under the assumption of conversion efficiency of a solar cell to be 18%.

Key words : メガフロートの建造方法 (Construction method of Mega-Float)

実効大気透過率 (Effective atmosphere transmissivity)

持続可能な社会 (Sustainable society)

CO₂フリー社会 (CO₂ free society)

洋上太陽光発電基地 (Ocean photovoltaic power generation base)

1. はじめに

2012年の世界のCO₂排出量は前年度比1.4%増の316

億トンであったと国際エネルギー機関 (IEA) が2013年6月10日発表した¹⁾。また、アメリカ海洋大気局 (NOAA) は太平洋上の日間平均CO₂量が同5月9日

* 宮城教育大学技術教育講座

に400.03ppmを超えたと発表した²⁾。

2013年1月16日にNASAは暑い2013年を予告していた³⁾。これを裏付けるように、異常気象(高温、干ばつ、豪雨、竜巻・突風)は世界各地で観測され続け、日本でも2013年8月12日に最高気温の更新(41.0度)など、各地は猛暑に見舞われた。NHKの調べでは、7月8日の梅雨明け後、連日猛暑日が続いており、5月末から8月25日までに熱中症とみられる症状で死亡した人は、全国で少なくとも338人に上っているという⁴⁾。

政・財・官・学そして電力業界は一体になり、「原発抜きでは2011年の暑い夏は越せない」という脅しを国民にかけて原発の再稼働を狙ったが、失敗した。2012年の夏に向けても同様の脅しを試みたがこれも失敗している。原発抜きでも十分な電力を確保できる設備能力があるのだ。

2012年当初は原発が10基稼働していたが、5月5日に北電泊原発3号機が停止後、8月3日の関電大飯原発3号機の再稼働までの間、原発稼働ゼロを記録した。8月16日に大飯原発4号も再稼働している。2012年の原発依存は平均して182万kWであった。原発の発電電力量に占める構成比率は1.7%に低下した。地熱と自然エネルギーを合わせて1.6%そして水力は8.4%であったので、残りの88.3%は火力が担った⁵⁾。その結果、2012年度のCO₂排出量は前年度に比較して7000万t増加した¹⁾。

CO₂排出量の増加に伴う地球環境の破壊・灼熱化が加速しており、CO₂排出量を減らす方策が差し迫った課題となっている。00年代はCO₂を発生させないといわれる原発が地球環境の保全の切り札と喧伝されて推進されてきた。その原発である東電福島第一原発は2011年3月11日東北地方太平洋沖地震によって破壊されて過酷事故を起こした。その後2年半を経過した現在も放射能汚染水の海洋への漏出を続けており、事故は拡大し続けている。さらに、国際原子力事象評価尺度(INES)の「レベル3」(重大な異常事象)に相当する、保管タンクからの放射能汚染水漏れという二次災害が発生している。

このような背景のもと、自然エネルギーの活用に一層関心が高まっている。2010年の耕作放棄地面積は40万haである⁶⁾。ここに変換効率が18%の太陽電池を敷き詰めれば、太陽光利用率を0.12と仮定して、8640万kWの電力を生み出すことができる。これに水力発電の電

力850万kWを加えれば、日本で必要とされる電力を賄うことができる。ところが、自然エネルギーの開発を活発に続ける民間企業・団体が確保した用地は自治体、民間企業が所有するものに限られ耕作放棄地は入っていない⁷⁾。地権者の問題や農地法など高い壁があり、まとまった土地を確保することが困難なのだろうか。それでも、「再生可能エネルギーの固定価格買取制度」の後押しもあって、平成24年度導入された太陽光発電の設備容量は321.5万kW(実質39万kW)に達した。今後の伸びが期待されるが、日本の定常需要電力である1億kWとの距離は大きい。

筆者は太陽光発電が有望であると考えており、福島第一原発の過酷事故が発生する以前から、用地問題を回避できる洋上太陽光発電基地建設を提案して取り組んできた^{8)~13)}。用地問題を解消する代償として、メガフロートの建造や電力の輸送法などの解決が課題として浮上してきた。

本論文はそのメガフロートの建造法を提案している。また、最適負荷を接続した状態での太陽電池の南鳥島での出力電力量を算出して、南鳥島洋上太陽光発電基地の広さを確定させている。さらに、その建造コストと工期の試算も行っている。

2. 南鳥島での直達日射量と受光エネルギー

本節では、南鳥島洋上太陽光発電基地¹⁴⁾上に配置された太陽電池に降り注ぐ受光エネルギーの大きさを、付録Aの受光エネルギー密度をもとにして検討する^{15)~17)}。太陽電池を図1に示すように配置する。すなわち、南を基準にして東向きを正の方向として μ 度、

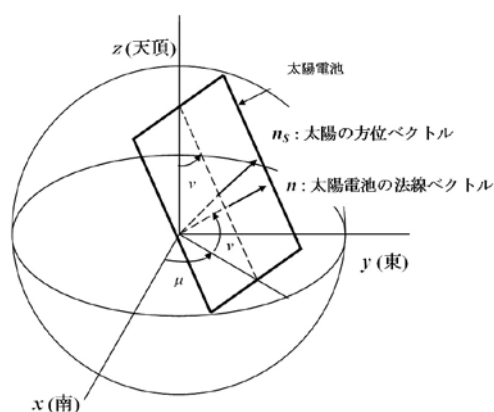


図1 太陽電池の設置と座標系

垂直線から ν 度だけ傾いて配置されている。

受光エネルギーを計算するためには緯度 (ϕ) と経度 (λ) が必要である。その他、大気透過率 T_0 および大気路程 m (エアマス)¹⁸⁾ も考慮に入れる。

計算では付録Bに説明した発電電力量自動計算プログラムを応用する。具体的には図B-2の受光エネルギー密度の項を、発電電力量の計算と同様に、6次の多項式で近似して積算受光エネルギーを求める。

2-1. 直達日射量と受光エネルギー密度との関係

本解析法では、 $\mu = 0$ (度) (真南向きに設置) および $\nu = 90$ (度) (水平に設置) とすれば、瞬時値を採用した場合、受光エネルギー密度の値はそのまま直達日射量となる。ところが、気象庁ではこの瞬時値ではなく積算値を採用している。

両者の関係を示したのが図2である。2015年6月22日(夏至)、南鳥島の日の出は3時57分そして日の入りは17時35分である。瞬時値での直達日射量を知りたいければ、対象時間の受光エネルギー密度の値を読めばよい。単位は (W/m^2) である。気象庁で採用する積算値は日の出から日の入りまでの瞬時値の積分値である。17時35分の値(実際は太陽電池表面に光が当たらなくなる直前の17時の値)である8.417972926 (kWh/m^2) が2015年6月22日の積算受光エネルギーであるが、これを直達日射量と呼んでいる。

なお、南鳥島の緯度・経度は表1のとおりである。

表1 南鳥島の緯度と経度

緯度 ϕ	24.283056 度
経度 λ	153.98639 度

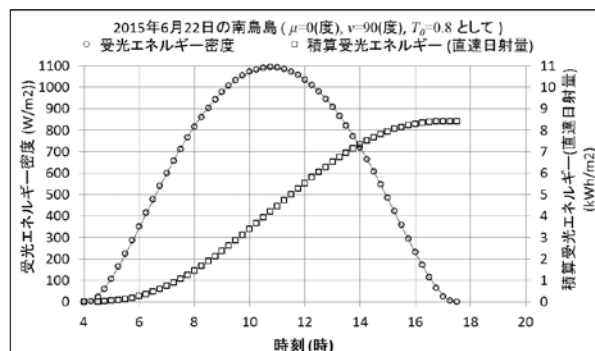


図2 日射量に関する瞬時値と積算値の関係

2-2. 直達日射量と積算直達日射量

図3aでは大気透過率 T_0 を0.8としており、実線は2015年各日の理論直達日射量を、破線は積算理論直達日射量を示している。理論直達日射量は夏至(6月22日、通算173日目)と冬至(12月22日、通算356日目)に最大値と最小値をとる。その値は、それぞれ、8.418 (kWh/m^2) および3.944 (kWh/m^2) であるから、約2.13倍の差がある。また、365日分の理論直達日射量の総和である積算理論直達日射量は2372 (kWh/m^2) である。

図3bは各日の理論直達日射量から前日のそれを差し引いた値、つまり増加分を示している。最大値は0.04344 (kWh/m^2)、最小値は-0.04292 (kWh/m^2) である。それらは春分の日(3月21日)と秋分の日(9月23日)に到達すると考えられがちであるが、それぞれ、2月27日と10月16日に到達する。それぞれ、春分の日の日23日前と秋分の日の日24日後のことである。

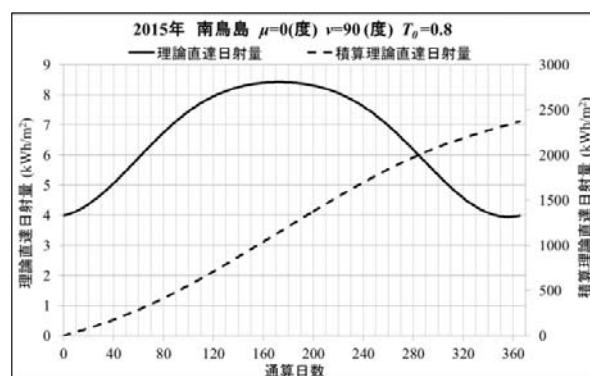


図3a 理論直達日射量と積算理論直達日射量

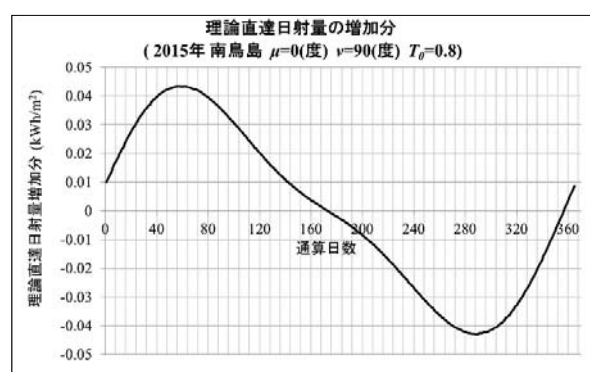


図3b 理論直達日射量の増加分

2-3. 理論受光エネルギーと積算理論受光エネルギー

$\nu = 90$ (度) のときの受光エネルギーを日射量と呼んだが、それ以外の角度では受光エネルギーと以後呼ぶことにする。

太陽電池は水平 ($\nu = 90$ (度)) に設置されることはなく、一定の傾き角を確保して設置される。図4aの実線は水平面から10度の傾きをもち ($\nu = 80$ (度)) ということ)、真南向き ($\mu = 0$ (度)) に設置されたときの太陽電池の理論受光エネルギーと積算理論受光エネルギーを示している。破線と一点鎖線は図3aに示した理論直達日射量と積算理論直達日射量であって、傾きの効果を見るために書き込んである。理論受光エネルギーの最大値と最小値は8.075 (kWh/m²) および4.778 (kWh/m²) である。それぞれ、6月21日と12月22日に到達している。

変動幅は、 $\nu = 90$ (度) のとき2.13倍であったものが、1.69 (=8.075/4.778) に縮小されている。また、積算受光エネルギーは2491 (kWh/m²) であるので、積算理論直達日射量である2372 (kWh/m²) より119 (kWh/m²) だけ増加している。理論受光エネルギーの日変動が少なくなり、積算理論受光エネルギーが増えたことは太陽電池を傾けたことの効用である。

図4bは理論受光エネルギーの増加分を表しており、最大値と最小値には2月21日と10月24日に到達する。それぞれの値は0.03627 (kWh/m²) 及び-0.03570 (kWh/m²) である。この図の結果は、理論受光エネルギーの変動幅が、前述 $\nu = 90$ (度) のとき最大値が

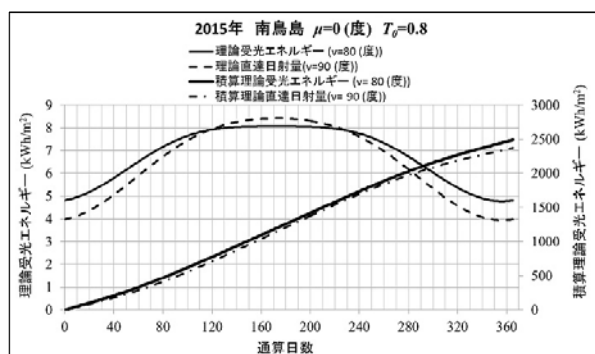


図4a 理論受光エネルギーと積算理論受光エネルギー

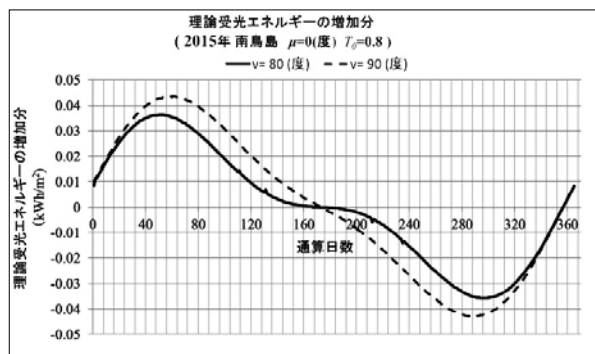


図4b 理論受光エネルギーの増加分

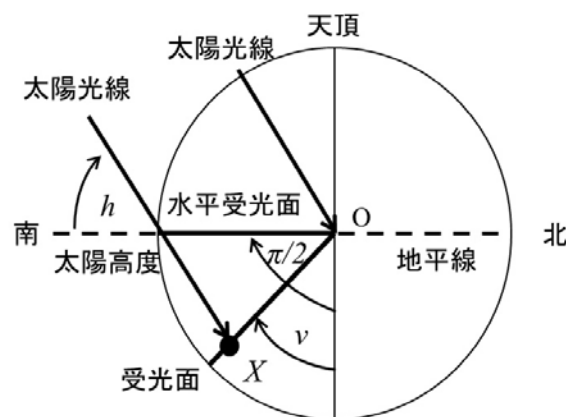


図5 太陽電池を傾けることの効用の説明図

0.04344 (kWh/m²)、最小値が-0.04292 (kWh/m²) であったことに比較して、減少したことを表している。

それではどうして受光面を傾けることによって受光エネルギーが増えるのだろうか。それを図式的に示したものが図5である。 $\nu = \pi/2$ である水平受光面に入射したエネルギーは、受光面のOX部分に集中する。点Xが円内にあれば、受光面を傾けた効果が現れて、より多くの光エネルギーを受け止めることができる。

太陽高度 h が高くて点Xが円の外になると、受光エネルギーは直達日射量より小さくなる。図4aでは4月28日(通算118日目)から8月16日(通算228日目)まではこのような状態が続いており、実線は破線より下になっている。なお、夏至である6月22日は4月28日と8月16日にそれぞれ55日の間隔がある。

2-4. 実効大気透過率について

第2-2節と第2-3節では南鳥島の大気透過率 T_0 を0.8としてきたが、実際はいかなる大きさなのであろうか。本節ではこれを検討する。

気象庁は南鳥島での各月の全天日射量を公開している¹⁹⁾。2012年までの信頼できる27年間分のデータを平均した値を示したのが、図6である。

大気透過率 T_0 を一定として、2015年1月の31日分の理論受光エネルギーを計算してその総和を求めて、1月の1日当たりの理論受光エネルギーを得る。この手続きを12月まで続ける。さらに、大気透過率 T_0 を0.64、0.68、0.7、0.72そして0.74と変化させてその結果を図7に書き込む。5本の曲線群が書き込まれることになるが、そのうち3本を書き込んだものが図7である。これを使って、平均全天日射量と各月1日当たりの平均受

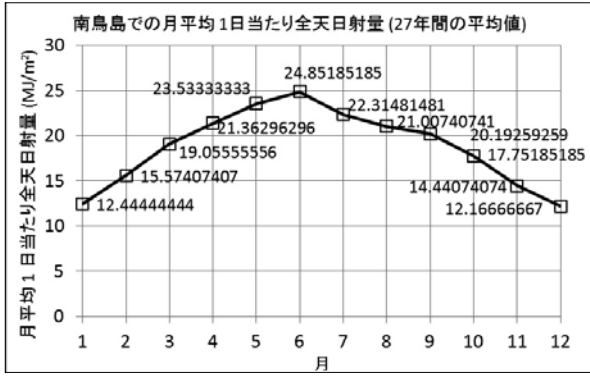


図6 南鳥島での各月平均1日当たりの全日射量

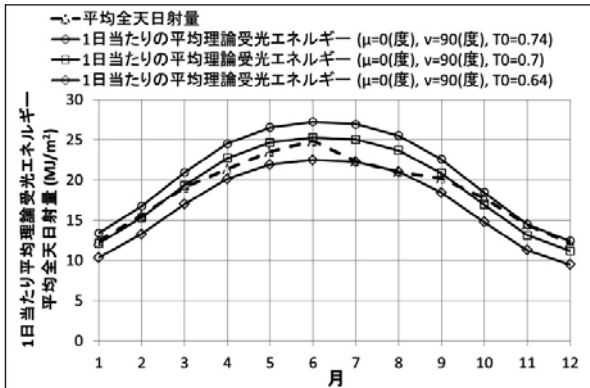


図7 各月1日当たり平均理論受光エネルギー

光エネルギーが一致する大気透過率を探す。それを「月別実効大気透過率」と呼ぶことにする。その計算結果が表2と図8に示されている。冬場に高く、夏場に低くなる実効大気透過率の特性が現れている。その値域は0.639から0.739である。

表2 南鳥島での月別実効大気透過率

1月	2月	3月	4月	5月	6月
0.71	0.707	0.693	0.668	0.675	0.691
7月	8月	9月	10月	11月	12月
0.64	0.639	0.683	0.721	0.739	0.732

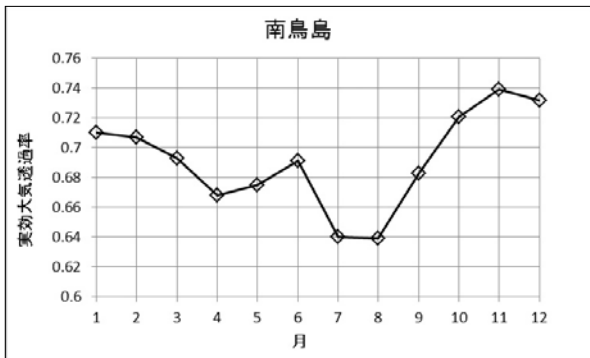


図8 月別実効大気透過率

3. 南鳥島での太陽電池による積算発電電力量

本節では太陽電池の発電電力量を計算するが、大気透過率として第2-4節で導入した月別実効大気率を採用する。太陽電池としてはSANYO製太陽電池モジュールHIP5517を想定する。その仕様は表3のごとくである。

結果は図9に掲げられている。設置角は① ($\mu = 0$ (度), $\nu = 85$ (度)) および② ($\mu = 0$ (度), $\nu = 80$ (度)) としている。発電電力量は表4のごとく得られる。

太陽電池モジュール1枚の面積が0.45045 (m^2) であるから、単位面積当たり換算値も記入してある。これらの数値は後に南鳥島洋上太陽光発電基地の年間発電電力量を評価するときに使用される。

表3 SANYO製太陽電池モジュールHIP-5517の仕様

面積: 0.455 (m) × 0.99 (m)
公称最大出力電力: 55 (W)
公称最大出力動作電圧: 17.2 (V)
公称最大出力動作電流: 3.2 (A)
公称短絡電流: 3.6 (A) at (1000 (W/m ²), 分光分布 AM=1.5 and 25°C)
公称開放電圧: 22 (V)

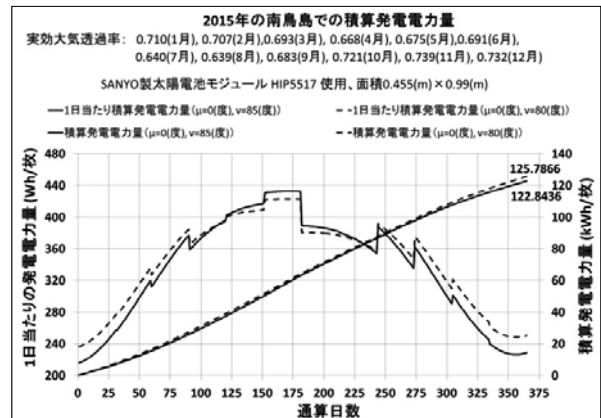


図9 南鳥島での太陽電池による積算発電電力量

表4 年間発電電力量

$\mu = 0$ (度), $\nu = 85$ (度): 122.84 (kWh/枚) 272.71 (kWh/m ²)
$\mu = 0$ (度), $\nu = 80$ (度): 125.79 (kWh/枚) 279.25 (kWh/m ²)

ところで、各月ごとに実効大気透過率を変えて発電電力量を計算することは煩わしいことである。より簡便な計算方法があれば研究を促進することになる。そこで、表2に示す月別実効大気透過率の平均値を「年間実効大気透過率」と呼ぶことにするが、それは0.692である。大気透過率をこの0.692と固定して、積算発電

電力量を計算してみる。 $(\mu = 0$ (度), $\nu = 85$ (度))として両者を比較したものが図10である。年間積算発電電力量は123.81 (kWh/枚) および122.84 (kWh/枚) とその差は0.97 (kWh/枚) であり、ほぼ一致している。別の考察から、 $(\mu = 0$ (度), $\nu = 85$ (度)) のときの年間実効大気透過率 T_0 は正確には0.6885であることが分かっているので、簡便計算ではこの値を使用する。

この簡便計算法を使って、設置角 μ が大幅に変化しても設置角 ν が90° 近傍であれば (水平設置)、年間積算発電電力量はほとんど変化しないことを示す。図11がその計算結果である。太陽電池の設置角 μ が東方向 ($\mu = 90$ (度)) から西方向 ($\mu = -90$ (度)) に変化しても、南中方向 ($\mu = 0$ (度)) に設置されている太陽電池の年間積算発電電力量122.84 (kWh/枚) との差は4.05 (kWh/枚) に過ぎない。真北方向を向いていても ($\mu = 180$ (度) および -180 (度))、8.18 (kWh/枚) だけ減少するに過ぎない。

後にメガフロート上に設置された太陽電池の積算発電電力量を議論するが、海流の状態などによってメガフロートの設置方向が変わっても、 $\mu = 0$ (度) の場

合の積算発電電力量で議論しても十分であることをこの数値は意味している。

4. 洋上太陽光発電基地用浮体の建造方法

4-1. 洋上太陽光発電基地建設の従来的見積もり

日本の総発電設備能力 (2 億7,400万 kW、2005年) 20) を賄うための太陽電池設備能力 (22億8,333万 kW (=2 億7400万 kW/0.12)) を設置することを検討してきた。その結果、次の点が明らかになっている⁸⁾。

- (1) 累積建設費用は約103兆円である。
- (2) 建設に要する時間は33.6年である。
- (3) 建設に要する面積は12,700km²である。
- (4) 太陽光発電方式は費用面だけでも原子力発電方式 (98兆円。原発事故を想定していない) に勝るとも劣らない方式である。

前提条件

- (1) 太陽電池のエネルギー変換効率は18%である。
- (2) 太陽光の利用率は12%である。
- (3) 太陽光発電所の生産コストは20%の習熟曲線に沿って低減する。

この基地は洋上に設置することになるので、浮体が必要になる。しかも巨大な浮体、メガフロートの建造が不可欠です。これを、図12のように、南鳥島近海の排他的経済水域に設置する。メガフロートには太陽電池パネル群を設置して発電を行い、その電力を使って真水を電気分解する。酸素と水素が発生するが、酸素はそのまま大気中に放出し、水素だけを液化してタンカーに積んで日本各地に設置されている燃料電池発電

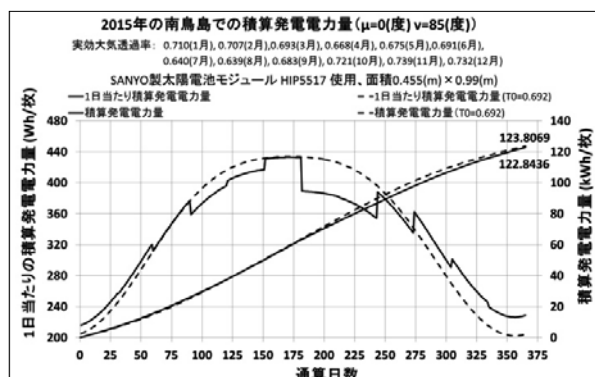


図10 年間実効大気透過率の効用

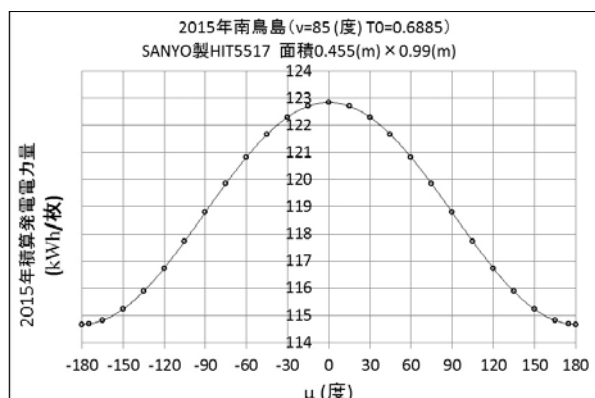


図11 設置角 μ による積算発電電力量の変化



図12 南鳥島近海に設置された南鳥島太陽光発電ユニット (2 km², 想像図)

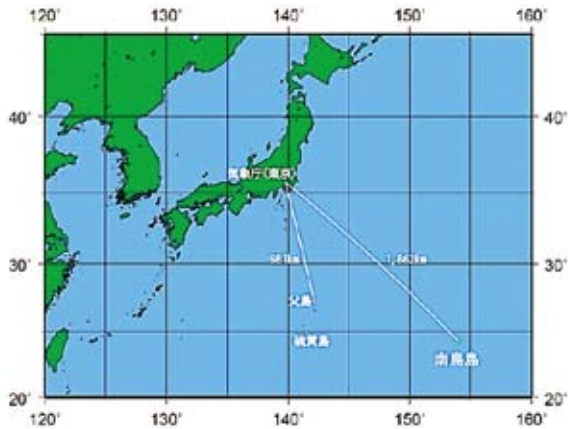


図13 南鳥島の位置（海上保安庁）

水を集めて、タンカーに積んで南鳥島洋上太陽光発電基地に輸送する。その水を使い、図15のような電解装置と液化機を組み合わせ、液化水素を生産する。それを再度タンカーに積んで、各陸上基地に輸送する。模式的に示すと、図16のようになって、水と水素の循環サイクルとなっていることが分かる。

4-2. メガフロートの建造方法

それ自体が巨大であるメガフロートを一度に建造することは不可能である。そこで、図17のような1辺の長さ (l) が107.46m、面積 S_0 が $5 \times 10^3 \text{m}^2$ の正三角形サブユニットを図18のように組み合わせて基本ユニットを組み立てる。このような組み立て方をすると、 n 段のときの面積 S は次のようになる。

$$S = n^2 S_0 \quad (\text{m}^2) \quad (1)$$

面積は、 $n=20$ 段では $2 \text{ (km}^2)$ である。そこで、 $2 \text{ (km}^2)$ のものを基本ユニットとする。

基本ユニットは図19のように2種類ある。相違は太陽電池を設置する面の傾斜である。これらに横通路をつけたものが図20である。2種類の基本ユニットを組み合わせれば、図21のように、種々の形状の発電基地を構成できる。

なお、サブユニットの3辺は通路である。基本ユニット全体の合計通路長は次のとおりである。

$$L_{00} = 3n^2 l \quad (2)$$

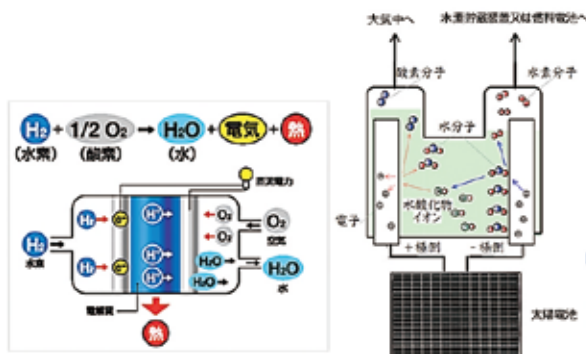


図14 燃料電池発電装置

図15 太陽電池を用いた水の電気分解

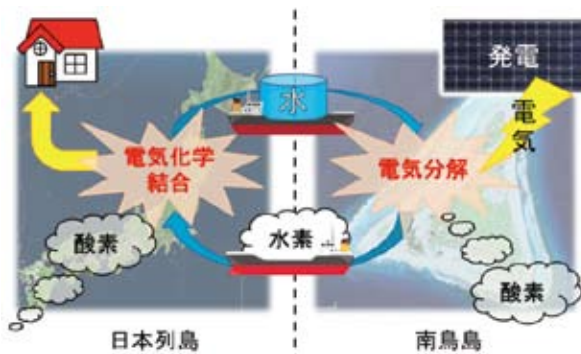


図16 水と水素の循環サイクル

基地に輸送する。ここで発生した電力は送電網を介して各消費者に届けられる。燃料電池で発生する排気ガスは水であるので、CO₂フリー社会が実現できる。

南鳥島は図13のように東京から東南方向1,862kmに位置しているので、遠距離との印象を受ける。ところが、ペルシャ湾と東京間のタンカー航路長は12,000kmであるので、その15%にすぎない。輸送コストや所要時間の点からも削減メリットがある。

さて、陸上の発電基地は図14のような燃料電池発電装置を集積して構成される。排気ガスとして発生する

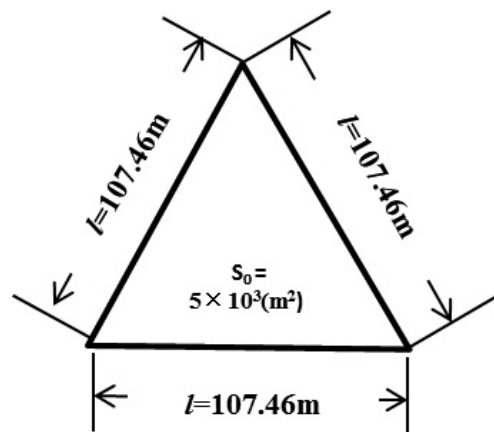


図17 正三角形で面積が5,000m²のサブユニット

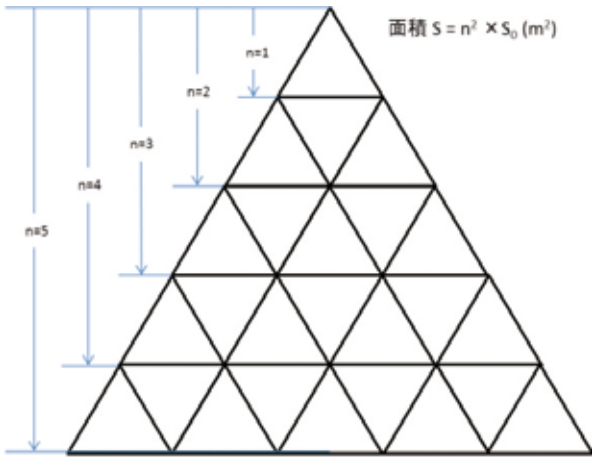


図18 太陽光発電基本ユニット

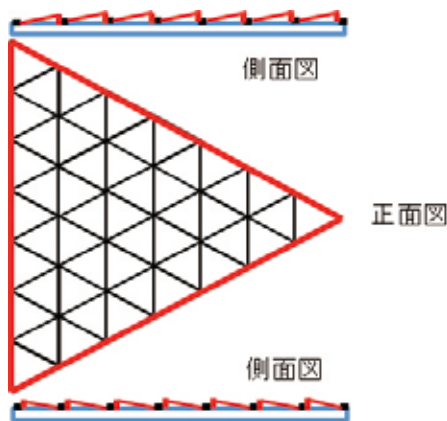


図19 二種類の基本ユニット

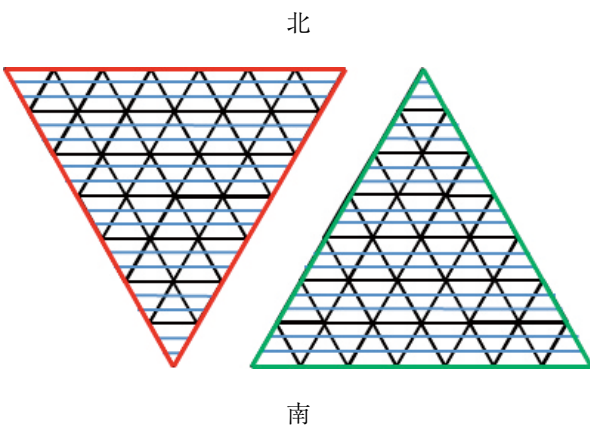
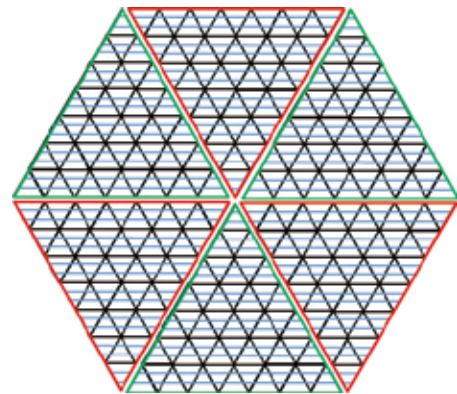
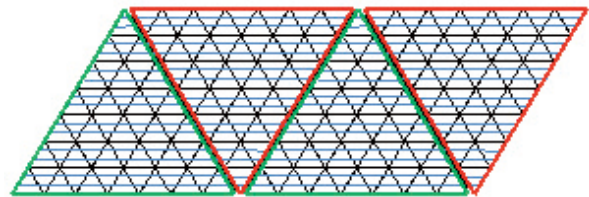


図20 横通路を加えた2種類の基本ユニット



(a)



(b)

図21 2種類の基本ユニットで構成した発電基地

4-3. サブユニット上の通路の検討

図20では横通路を設けたが、太陽電池の設置作業を考えて縦通路も設けなければならない。5,000m²サブユニット上で見れば、その通路状態は図22に示されるものとなる。その長さは式(3)、式(4)および式(5)で計算できる。

横通路長 (一辺の等分区間数 m_0 の場合) L_0

$$\begin{aligned}
 L_0 &= l \{ (m_0 - 1)/m_0 + (m_0 - 2)/m_0 + \dots \\
 &\quad + 2/m_0 + 1/m_0 \} \quad (3) \\
 &= (l/m_0) \{ (m_0 - 1) + (m_0 - 2) + \dots + 2 + 1 \} \\
 &= (m_0 - 1)l/2
 \end{aligned}$$

縦通路長 L_1

① 一辺の等分区間数 m_1 が奇数の場合

$$\begin{aligned}
 L_1 &= (l\sqrt{3}/2) \{ 1/(m_1/2) + 2/(m_1/2) + \dots \\
 &\quad + [m_1/2] / (m_1/2) \} \quad (4) \\
 &= (2l\sqrt{3}) \{ 1 + 2 + \dots + [m_1/2] \} / m_1 \\
 &= (l\sqrt{3}/m_1) (1 + [m_1/2]) [m_1/2]
 \end{aligned}$$

ここで、 $[m_1/2]$ はガウスの記号であって、 $m_1/2$ をこえない最大の整数を意味する。

② 一辺の等分区間数 m_1 が偶数の場合

$$\begin{aligned}
 L_1 &= (l\sqrt{3}/2) \{1 + 2(m_1/2 - 1) / (m_1/2) \\
 &\quad + 2((m_1/2 - 2) / (m_1/2) + \dots + 2 \cdot 1 / (m_1/2)\} \\
 &= (l\sqrt{3}/2) \{m_1 + 2(m_1 - 2) + 2(m_1 - 1) \quad (5) \\
 &\quad + \dots + 2 \cdot 2\} / m_1 \\
 &= (l\sqrt{3}/4) m_1
 \end{aligned}$$

なお、図22の分割は $m_0=18$ および $m_1=9$ に対応する。

分割数 m_0 と m_1 が公約数を有すれば、異なる区画形状の数が少なく、製作に有利になる。現実的なものは $m_0=m_1$ となるように製作することである。表5は、この条件で計算したが、通路面積とその占有率の分割数ごとの値である。計算では周囲通路と横通路の幅は2(m)、縦通路の幅は1(m)としている。分割数が8のとき占有率は1/3を超えてしまうことが分る。分割数が7であれば占有率が1/3以下であるので、これが現実的な分割数と考える。

分割数を7とした2種類のサブユニット上に太陽電池を配置した様子が図23である。これらを組み合わせれば2種類の基本ユニットが構成できる。図24はこれ

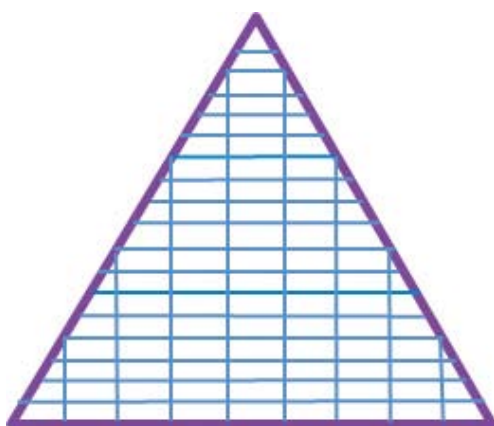


図22 横通路と縦通路を設けたサブユニット

表5 通路面積と占有率の均等分割数依存性

均等分割数	通路幅2(m)		通路幅1(m)	(m ²)	
	周囲通路面積	横通路面積	縦通路面積	合計通路面積	占有率
1	644.76	0	0	644.76	0.128952
2	644.76	107.46	93.06309	845.2830899	0.169057
3	644.76	214.92	124.08412	983.7641199	0.196753
4	644.76	322.38	186.12618	1153.26618	0.230653
5	644.76	429.84	223.35142	1297.951416	0.25959
6	644.76	537.3	279.18927	1461.24927	0.29225
7	644.76	644.76	319.07345	1608.593451	0.321719
8	644.76	752.22	372.25236	1769.23236	0.353846
9	644.76	859.68	413.61373	1918.053733	0.383611
10	644.76	967.14	465.31545	2077.215449	0.415443
11	644.76	1074.6	507.61685	2226.976854	0.445395
12	644.76	1182.06	558.37854	2385.198539	0.47704
13	644.76	1289.52	601.33073	2535.610735	0.507122

らを3段重ねた状態を示す。20段重ねれば基本ユニットが完成する。

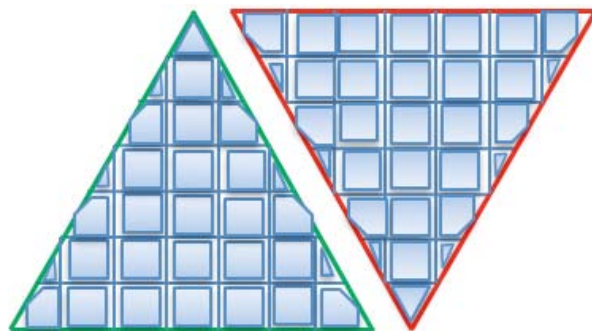
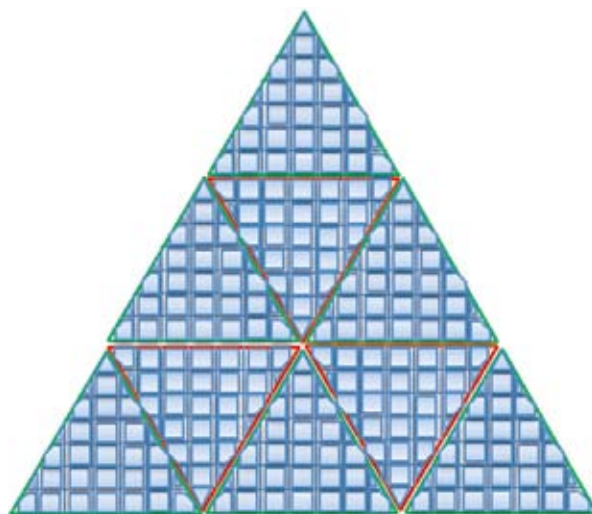
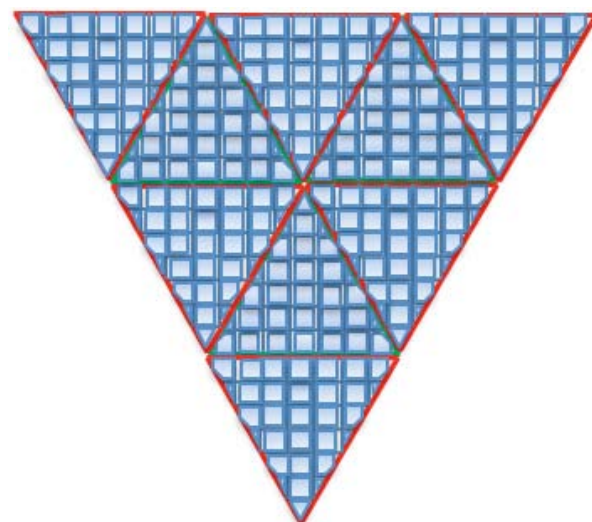


図23 分割数7のサブユニット上に配置された太陽電池群



(a)



(b)

図24 2種類のサブユニットを3段重ねた状態

4-4. 太陽電池設置ブロックの傾斜角

図23のように均等に7分割されたサブユニットの太陽電池設置ブロックは、図25の大きさになる。太陽電池設置面は北辺が南辺より1 (m) 高く作る。これによって、北辺の影が2 (m) の通路をはさんで北側に隣接するブロックに当たる時間帯を狭めることができる。このときの設置面の傾斜角は5.06 (度) ($=\tan^{-1}(1/11.29)$) である。

傾斜角を5度としたければ、南北の高低差は98.8 (cm) ($=11.29 (m) \times \tan(5^\circ)$) とすればよい。次節では傾斜角を5度として計算する。

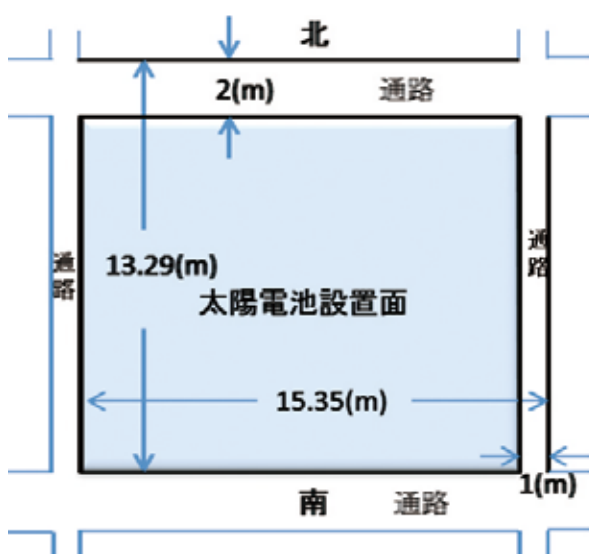


図25 太陽電池設置ブロック

4-5. 南鳥島洋上太陽光発電基地の面積

第4-1節で示した基地の面積やコストは概算値であった。ここにきて、ようやく基地の面積を正確に評価できるようになった。

太陽電池設置面の傾斜角が5度のとき ($\nu = 85$ (度)) の年間発電電力量は表4に示すとおり、272.71 (kWh/m²) である。これを定常の発電電力に換算すると、0.03113 (kW/m²) ($=272.71 / (365 \times 24)$) となる。日本の総発電設備能力は2億7,400万 kW (2005年)²¹⁾ であるので、これを賄うために必要な太陽電池の面積は8802 (km²) ($=2.74 \times 10^8 (kW) / 0.03113 (kW/m^2)$) である。さらに、通路の面積を加えなければならないので、表5の結果に従い、本基地の面積は12980 (km²) ($=8802 / (1-0.321719)$) の大きさとなる。

5. メガフロートの建造の実現性とコスト

洋上太陽光発電基地は6490 ($=12980 (km^2) / 2 (km^2)$) 基の上記基本ユニットで構成される。この基数を33.6年かけて建造するので、年間193基を作る必要がある。これは47日で25基の建造という進度になる。この数値から実現性のない計画のように思えるが、実現できる。それを以下に説明する。

2010年の国内メーカーの自動車生産台数は22,695,876台 (国際自動車工業連合会世界ランキング統計局)²¹⁾ である。1日当たりに換算すると62,180台となる。この台数をメガフロート上の4m四方 (16m²) に1台の割合で配置すると、必要面積は62,180 \times 16 (m²) = 9.9488 \times 10⁵ (m²) = 0.99488 (km²) となる。

ところで、自動車1台当たりの資材・エネルギーを使えば、メガフロートの一部16 (m²) を建造することは無理のないことのように思われる。つまり、1日の自動車生産台数で0.99488 (km²) のメガフロートを建造できる。

この前提に立てば、基本ユニットの面積は2 (km²) であるので、1基建造に要する時間は2.0103日 ($=2 (km^2) / 0.99488 (km^2)$) となる。6490基を建造するために要する時間は13047日 ($=2.0103 (日/基) \times 6490 (基)$)、すなわち、35.745年となる。33.6年をやや超えてしまうが、35.745年以内に南鳥島洋上太陽光発電基地は完成することになる。

図26はサブユニット2基と同じ面積1万m²以上に16m²ごとに配置された625台の自動車群を示す。625台の資材・エネルギーを使えば、サブユニットは建造可能であるとの感触を得ることができないだろうか。自動車一台の資材費を25万円とすると、サブユニット2基は1.5625億円で作れるので、ユニット1基は312.5億円 ($= (20^2/2) \times 1.5625$) となる。基地全体ではその6490倍の202兆8130億円で建造できる。年間支出は5兆6739億円 ($=202.813/35.745$) になるが、完成した発電基地からの売電収入も順次増え続けるので、負担感はいずれもそれほどでもないであろう。

また、高効率の太陽電池を採用すれば、必要面積も少なくなるので、基本ユニットの数が減少する。HIP5517の変換効率は12%であるが、変換効率が18%のもの (市販されている) を採用すれば、必要基数は2/3となる。その結果、建造費用は135兆2100億円で低減す

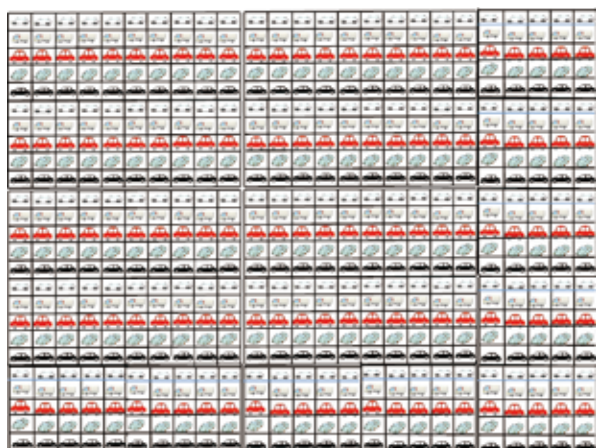


図26 サブユニット2基と同じ面積（1万m²）上に16m²ごとに配置された625台の自動車

る。変換効率が24%であれば、建造費用は101兆4060億円である。もちろん、工期も建造費用に比例して減少する。

近い将来、地球のエネルギー資源は確実に枯渇する。その前に汲めど尽きない本南鳥島洋上太陽光発電基地を建設して、将来に備えることこそ現代人に課せられた責務ではないだろうか。

6. まとめ

第二節では、日射量とは水平面（ $\nu = 90$ （度））に降り注ぐ受光エネルギー密度の一日にわたる積算値である、と定義を明確にしている。 $\nu = 90$ （度）以外のは受光エネルギーと呼んでいる。

気象庁は南鳥島での月別1日当たりの平均全天日射量を公表している。この平均全天日射量に見合う月別大気透過率を表2の値であることを割り出している。この値を「月別実効大気透過率」と呼ぶことにするが、冬場に高く、夏場に低い特性を示している。

第三節では、この「月別実効大気透過率」を使って、最適負荷が接続されている状態の太陽電池の南鳥島での積算発電電力量を、2015年の各日（365日）にわたって計算している。太陽電池は変換効率12%のSANYO製HIP5517を前提としている。その結果、この太陽電池では、（ $\mu = 0$ （度）、 $\nu = 85$ （度））のとき1m²当たり272.71（kWh/年）の積算発電電力量が期待できることが明らかになった。

また、 μ が-90度から90度の範囲で変化しても、積算発電電力量は（ $\mu = 0$ （度）、 $\nu = 85$ （度））でのそれ

と比較して、3.297%の減少を示すだけであることも明らかにしている。

第四節では、日本の総発電設備能力（2億7400万kW）を賄うことができる、南鳥島近海の排他的経済水域に設置される洋上太陽光発電基地（メガフロート）を検討している。具体的には①必要面積、②建造方法の検討を行い、次の結果を得ている。

- ① 必要面積は、占有率が32.17%である通路を含めると、12,980km²である。
- ② 1辺が107.46mの正三角形であるサブユニット（基本材質は強化プラスチック）を組み合わせて、やはり正三角形である面積が2km²の基本ユニットを作り上げる。発電基地はこの基本ユニット6490基で構成できる。
- 第五節では、日本の自動車工業会の生産実績に基づき、③コストと④工期の試算を、行っている。
- ③ コストは、変換効率が12%のHIP5517を採用すると、202兆8130億円である。変換効率が18%の太陽電池（市販されている）を採用すれば、面積に比例するの
で135兆2080億円で低減する。
- ④ 工期は、変換効率を12%として、35.7年である。

参考文献

- 1) 電気事業連合会 海外電力関連トピックス情報（2013/6/21）；IEA、世界の2012年CO₂排出量は過去最高の316億トンと発表 http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1228566_4115.html
- 2) ネットワーク『地球村』環境情報（2013/5/14）；地球のCO₂濃度が人類史上最大400ppmへ <http://www.chikyumura.org/environmental/topic/2013/05/14120008.html>
- 3) AFPBB NEWS（2013/1/16）；2013年は過去最高の暑さとなる、NASA <http://WWW.afpbb.com/article/environment-science-it/environment/2921012/10113006>
- 4) NHK ニュース（2013/8/27）；熱中症 この夏全国で338人死亡 <http://www3.nhk.or.jp/news/html/20130827/k10014074801000.html>
- 5) 電気事業連合会： 2012年度電源別発電電力量構成比 http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/1227416_1511.html
- 6) 農林水産省；農地に関する統計 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/sihyo/data/10.html>
- 7) 資源エネルギー庁；なっとく！再生可能エネルギー固定価

格買取制度 www.enecho.meti.go.jp/saiene/kaitori/index.html

- 8) 草野清信：持続可能な社会の建設（Ⅰ）洋上太陽光発電基地 真の環境教育に向けて、宮城教育大学紀要第45巻，pp.165-179（2010）
- 9) 草野清信：持続可能な社会の建設（その1），日本科学者会議第18回総合学術研究集會予稿集，B-2-2（2010、宮城）
- 10) 草野清信：持続可能な社会の建設（その2），日本科学者会議第18回総合学術研究集會予稿集，B-2-3（2010、宮城）
- 11) 草野清信：3.11大地震で海水に浸った農地の復興事業から脱原発・CO₂フリー社会の建設事業へ，日本科学者会議東北地区会議 第22回東北地区シンポジウム資料集（2011年10月22日，青森市）
- 12) 草野清信：3.11大震災によって海水面下にある農地の復興事業から脱原発・CO₂フリー社会の建設事業へ，日本の科学者，Vol.47, No.5, pp.40-46（2012）
- 13) 草野清信：脱原発社会への道－LNGコンバインドサイクル発電－ 化石エネルギーから自然エネルギーへの移行の必然性－，日本科学者会議第19回総合学術研究集會予稿集，C-5-3（2012，岡山）
- 14) 草野清信：持続可能な社会の建設（Ⅱ）LNGコンバインドサイクル発電 化石エネルギーから自然エネルギーへの移行の必然性 洋上太陽光発電基地，宮城教育大学紀要第47巻，pp.193-205（2012）
- 15) 若生康二郎 編：地球回転，恒星社厚生閣（1979）
- 16) 長沢 工 著：日の出・日の入りの計算，地人書館（1999）
- 17) 天文ガイド編：太陽観測，誠文堂新光社（2009）
- 18) Fritz Kasten and Andrew T. Young：Revised optical air mass tables and approximation formula, Applied Optics, Vol.28, pp.4735-4738（1989）
- 19) 気象庁 気象統計情報 http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s3.php?
- 20) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット編：「エネルギー・経済統計要覧」，pp195，(財)省エネルギーセンター（2013）
- 21) 国際自動車工業連合会世界ランキング統計局：世界自動車生産台数メーカー別ランキング（2010年）
<http://10rank.blog.fc2.com/blog-entry-40.html>

付録 A 受光エネルギー密度の理論式

A.1 受光エネルギー密度の理論式

太陽の方位を表す最も自然な方法は、図 A-1に示す地平座標系の方位角 A （北を基点にして東、南、西への回転方向を正とする）と高度 h （地平面を基点にして北回りを正とする）を用いることである。太陽の方位ベクト

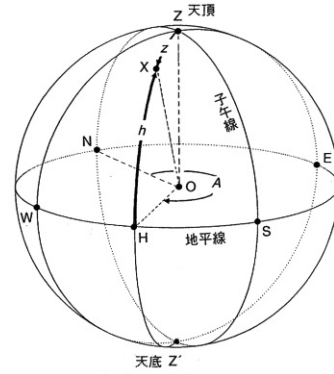


図 A-1 地平座標系

ル n_s （ベクトル OX のこと）は次の通りである。

$$n_s = -\cos(h)\cos(A)i_x + \cos(h)\sin(A)i_y + \sin(h)i_z \quad (\text{A-1})$$

太陽電池を図 A-2のように立てかけて太陽光を受け取るとする。受光面は真南から μ （度）東の方向を向いており（真南： $\mu = 0$ （度）、真東： $\mu = 90$ （度）、真西： $\mu = -90$ （度））、また、垂直線から ν （度）傾いている（垂直： $\nu = 0$ （度）、水平： $\nu = 90$ （度））。太陽電池の法線ベクトル n は次の通りである。

$$n = \cos(\nu)\cos(\mu)i_x + \cos(\nu)\sin(\mu)i_y + \sin(\nu)i_z \quad (\text{A-2})$$

さて、 $1 \text{ (m}^2\text{)}$ である太陽電池は太陽から見ればそれ以下である。その面積 S_0 は n と n_s の内積である $n \cdot n_s$ に縮小される。すなわち、

$$S_0 = n_s \cdot n = -\cos(h)\cos(\nu)\cos(A+\mu) + \sin(h)\sin(\nu) \quad (\text{A-3})$$

S_0 は負になることがあるが、これは太陽が太陽電池の背面から照射していることに対応しており、発電がおこなわれないことを意味する。

$1 \text{ (m}^2\text{)}$ の太陽電池が太陽から受け取る受光エネルギー密度 $P_0 \text{ (kW/m}^2\text{)}$ は、太陽定数を $N_s \text{ (kW/m}^2\text{)}$ とすれば、上記 S_0 を用いて、次のように書き表される。

$$P_0 = N_s S_0 = N_s (-\cos(h)\cos(\nu)\cos(A+\mu) + \sin(h)\sin(\nu)) \quad (\text{A-4})$$

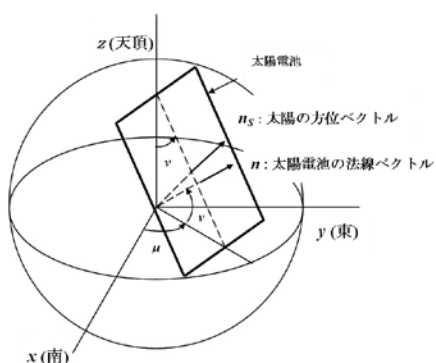


図 A-2 太陽電池の設置状態

これが太陽電池の受光エネルギー密度の理論式である。

式 (A-4) を用いれば直ちに計算が可能のように思われるが、そうではない。太陽の運行を示す方位角 A と高度 h の理論式が明らかにされていないからである。それを求めるためには、黄道座標系上の太陽の理論位置を赤道座標系に変換し、さらに、それを時角赤緯座標系に変換する。この結果を図 A-1 に示す地平座標系に変換して、 A と h の理論式とする。ここではその過程は複雑なので省略する¹⁶⁾。

式 (A-4) では大気透過率 T_0 と大気路程 m を考慮していない。これらを考慮すると受光エネルギー密度の理論式は次のように書き換えられる。

$$P_0 = N_s T_0^m (-\cos(h) \cos(v) \cos(A+\mu) + \sin(h) \sin(v)) \quad (A-5)$$

大気路程 m は Kasten と Young の次の式を採用する¹⁸⁾。

$$m = 1 / (\sin(h) + 0.50572(h + 6.07995)^{-1.6364}) \quad (A-6)$$

なお、式 (A-6) の角度の単位は [度] である。

A.2 受光エネルギー密度の理論式の検証

前節では太陽の運行を加味した太陽電池の発電電力量を見積もるための受光エネルギー密度の理論式である式 (A-5) を得た。本節ではこの理論式の妥当性の検証を行う。

本学の学生会館（萩朋会館）の屋上には30 (kW) の太陽電池パネルが設置されている。その設置パラメータは、 $\mu = 7.1$ (度) そして $v = 80$ (度) である。また、

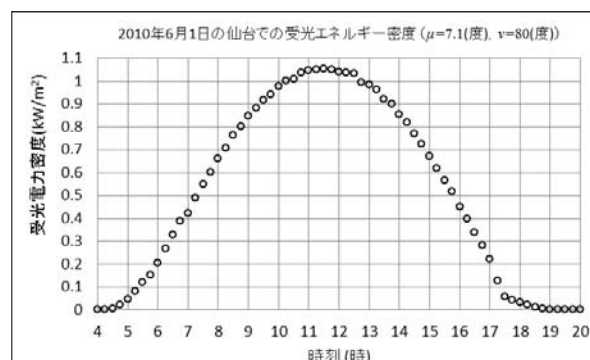


図 A-3 受光エネルギー密度の実測例

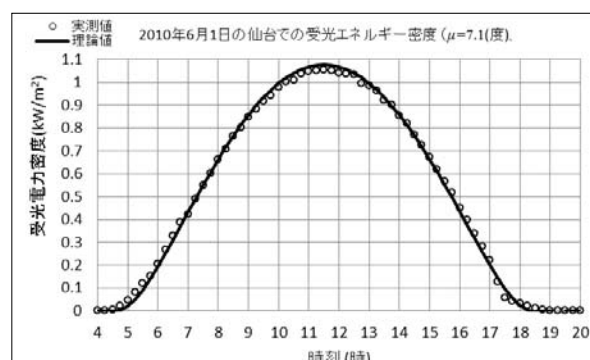


図 A-4 受光エネルギー密度の理論と実測の比較

本会館の緯度と経度は、それぞれ、38.258135 (度) および140.830028 (度) である。この設備では種々のデータが1分ごとに計測、格納されている。図 A-3 は2010年6月1日の15分ごとの受光エネルギー密度の測定値を示している。この日は快晴であって雲ひとつない日であった。

大気透過率 T_0 を0.8と仮定して計算された2010年6月1日の受光エネルギー密度が図 A-4 である。丸点 (○) が図 A-3 の実測値を表している。両者がよく一致していることが分かる。

A-3 年間の受光エネルギー密度の変化

式 (A-5) の妥当性が検証されたので、これを使って、2010年の各月1日の受光エネルギー密度を計算した。結果は図 A-5 に示した。もちろん、計算条件は $\mu = 7.1$ (度)、 $v = 80$ (度) そして $T_0 = 0.8$ である。この図から受光エネルギー密度は冬場と夏場では2倍程度の差のあることが分かる。積算受光エネルギーでは3～4倍程度の差のあることが、この図から読み取れる。

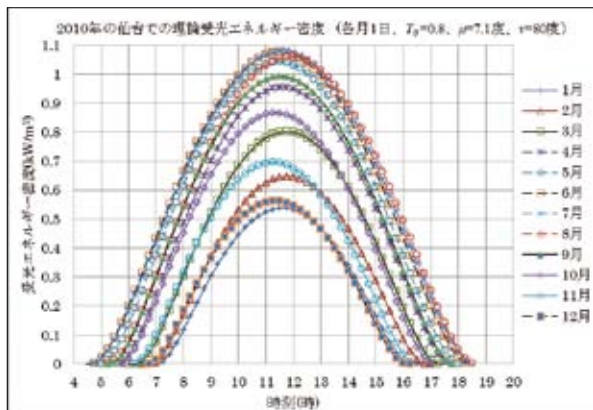


図 A-5 年間の受光エネルギー密度の変化 (2010年)

付録 B 発電電力自動計算プログラム

付録 A では VBA を用いて計算プログラムを組んだが、本節では C 言語を用いて作成した発電電力自動計算プログラムを用いる。本節では計算に関係する一連の流れを2015年6月22日の南鳥島を例にあげて説明する。

B-1 コマンドに情報を入力しメモ帳に発電電力を出力

図 B-1 の赤線で囲まれている箇所に入力したい年とその日付を入力する。図 B-1 では日本で最も昼が長いとされている夏至 (6月22日) に設定し、南鳥島の緯度と経度を入力している。すると、青線の箇所に太陽の位置を詳細に計算し、太陽の日の出、日の入り時刻とともにその方位角等を画面に表示するように設定してある。

次に太陽電池の設置角は、図 A-2 に示すとおり 2 つあり、緑線の箇所の MYU (μ) と NYU (ν) である。MYU とは西を -90° 、真南を 0° 、東を 90° とする設置角である。NYU は垂直状態を 0° 、水平を 90° とするもう 1 つの設置角のことである。図 B-1 では [MYU = 0, NYU = 80] と設定しているので太陽電池は真南を向いて、地面に対し 10° の傾きで設置されている。

これらの入力した情報と付録 A で説明した太陽の位置をもとに発電電力等を計算してテキストファイルの形で「メモ帳」に出力する。それが図 B-2 の左半分の黒の数値群である。日の出以降 15 分置きに太陽電池のステータスを表示している。

```

Yを読み込んでください :15
Mを読み込んでください :5
Dを読み込んでください :22
Gを読み込んでください :12
DTを読み込んでください :66
PHAI(緯度)を読み込んでください :24.283056
RAHA(経度)を読み込んでください :153.986390

2015年6月22日 12.000000時 66.000000秒 経度=24.283056 緯度=153.986390 [度]
ユリウス年 = 15.470570 恒星時 = 108.971401, 黄経 = 90.410914 距離 = 1.016282
赤経 = 90.447863 赤緯 = 23.436640
日の出時刻 3(時) 56.584489(分)
日の出方位角 63.700763
日の入り時刻 17(時) 35.203321(分)
日の入り方位角 296.297564(度)
太陽高度角 10(時) 45(分) 53(秒)

MYUを読み込んでください :0
NYUを読み込んでください :80
TOを読み込んでください :0.8
G11を読み込んでください :4
G12を読み込んでください :15
NFを読み込んでください :72
    
```

図 B-1 コマンドに情報を入力する

時刻	受光エネルギー密度 (W/m²)	短絡電流 (A/m²)	電圧 (V/m²)	電流 (A/m²)	出力電力 (W/m²)	近似的電圧 (V/m²)	近似的出力電力 (W/m²)
4:00	7.881	0.020370	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4:05	34.902	0.122757	0.020615	1.820291	0.232019	0.020615	0.000000
5	76.713	0.271486	0.040919	3.992637	0.521224	0.040919	0.000000
5:05	128.273	0.481793	0.120800	1.547678	3.22191308	0.120800	0.000000
5:10	138.991	0.608878	0.204902	1.044720	1.04221724	0.204902	0.000000
5:15	147.441	0.693758	0.232047	1.453440	1.45320255	0.232047	0.000000
5:20	154.863	1.194020	1.210194	1.810194	1.81019400	0.894888	0.000000
5:25	178.218	1.295794	1.444889	2.171791	2.17179122	1.02162902	0.000000
5:30	198.389	1.589100	1.232048	2.818702	2.81870200	1.36210402	0.000000
5:35	222.724	1.838621	1.927288	3.152889	3.15288900	1.91018888	0.000000
5:40	248.902	2.020786	3.061118	2.821988	2.82198800	2.82198800	0.000000
5:45	264.508	2.244828	4.000000	3.000000	3.00000000	4.00000000	0.000000
5:50	262	2.493027	5.280711	4.330488	4.33048800	4.88000000	0.000000
5:55	249.383	2.652985	5.910000	4.120000	4.12000000	4.82000000	0.000000
6	208.223	2.821620	7.243004	3.613204	3.61320400	4.67000000	0.000000
6:05	136.307	3.010704	8.906887	3.379688	3.37968800	4.67000000	0.000000
6:10	80.9440	3.172220	8.920000	3.120000	3.12000000	4.68000000	0.000000
6:15	40.300	3.281418	8.271213	2.842004	2.84200400	4.68000000	0.000000
6:20	16.881	3.445776	6.811423	4.475144	4.47514400	4.68000000	0.000000
6:25	6.8881	3.660112	5.971428	6.120440	6.12044000	4.68000000	0.000000
6:30	1.08112	3.850000	5.820713	6.820447	6.82044700	4.68000000	0.000000
6:35	1.02810	3.799000	5.210000	6.820000	6.82000000	4.68000000	0.000000
6:40	1.006308	3.6027	5.820713	6.820000	6.82000000	4.68000000	0.000000
6:45	1.008053	3.848314	5.50527	7.000000	7.00000000	4.68000000	0.000000
6:50	1.026308	3.678642	5.5207	7.000000	7.00000000	4.68000000	0.000000
6:55	1.078708	3.680417	5.210000	7.182400	7.18240000	4.68000000	0.000000
7	1.077400	3.878807	5.520716	7.000000	7.00000000	4.68000000	0.000000
7:05	1.079200	3.892004	5.500000	7.000000	7.00000000	4.68000000	0.000000
7:10	1.078200	3.803023	5.810000	6.812400	6.81240000	4.67000000	0.000000
7:15	1.060000	3.141417	5.800000	6.800000	6.80000000	4.67000000	0.000000
7:20	1.049004	3.602944	5.810449	6.820000	6.82000000	4.67000000	0.000000
7:25	896.428	3.571000	5.8207	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
7:30	891.833	2.460000	6.1200	6.820000	6.82000000	4.67000000	0.000000
7:35	892.843	2.270000	6.8200	6.820000	6.82000000	4.67000000	0.000000
7:40	895.610	3.188400	6.8200	6.820000	6.82000000	4.67000000	0.000000
7:45	847.700	3.020472	6.810000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
7:50	794.839	2.858444	7.200000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
7:55	740.100	2.694800	7.600000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8	688.618	2.470000	8.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:05	637.5	2.272000	8.400000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:10	571.800	2.056004	8.800000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:15	505.800	1.830000	9.200000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:20	447.000	1.600000	9.600000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:25	392.800	1.370000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:30	341.500	1.140000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:35	292.800	0.910000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:40	246.800	0.680000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:45	203.500	0.450000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:50	162.800	0.220000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
8:55	124.800	0.000000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
9	89.500	0.000000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
9:05	50.800	0.000000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
9:10	10.800	0.000000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000
9:15	0.000	0.000000	1.000000	6.810000	6.81000000	4.67000000	0.000000

図 B-2 自動的にメモ帳に出力 (2015年6月22日)

図では太陽電池一枚当たりの発電電力 (付録 C 参照) のほか、 $1 \text{ (m}^2\text{)}$ 当たりの受光エネルギーとそれに対応する太陽電池の短絡電流 (付録 C 参照) 及び最適負荷 (付録 D 参照) がわかる。

B-2 テキストデータを Excel にコピーする

前述テキストデータを Excel にコピーすると図 B-3 にあるグラフが自動的に作成される。同時に、発電電力を近似する 6 次多項式 (赤字) が表示される。発電電力 P_t は、図 B-3 の例では、次の式で近似計算できる。

$$P_t = 0.0002525943 t^6 - 0.0163258327 t^5 \\
 + 0.4546673945 t^4 - 6.9605977395 t^3 \\
 + 58.6508394050 t^2 - 234.5346810444 t$$

+ 343.6088302426

一般には次の式で近似計算される。

$$P_i = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6 \quad (B-1)$$

受光現時の積算発電電力量 W はこの式を用いて次のように近似できる。

$$\begin{aligned} W &= \int_{t_0}^t P_i dt \\ &= (a_0 t + a_1 t^2/2 + a_2 t^3/3 + a_3 t^4/4 \\ &\quad + a_4 t^5/5 + a_5 t^6/6 + a_6 t^7/7) \\ &\quad - (a_0 t_0 + a_1 t_0^2/2 + a_2 t_0^3/3 + a_3 t_0^4/4 \\ &\quad + a_4 t_0^5/5 + a_5 t_0^6/6 + a_6 t_0^7/7) \end{aligned} \quad (B-2)$$

もちろん、1日の積算電力量は、式 (B-2) において t の値として太陽光が太陽電池に当たらなくなった時刻の値を、代入すれば得られる。なお、受光開始時は太陽光が太陽電池面に当たり始めた時刻である。

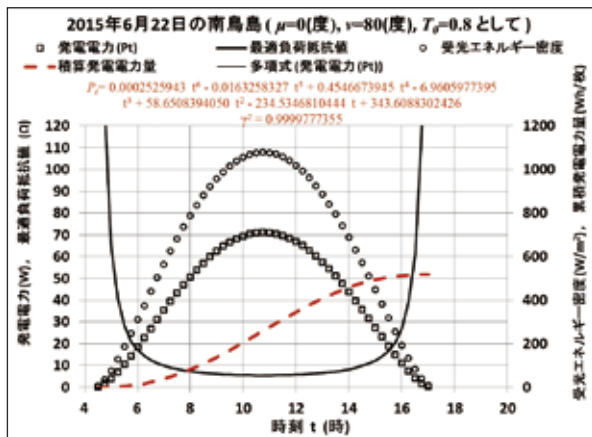


図 B-3 太陽電池のステータス

図 B-2 の赤字で示した数値群は式 (B-1) と式 (B-2) を用いて計算して得られたものである。図 B-3 の赤の破線は各時刻の積算発電電力量を示す。1日の積算発電電力量はこの破線の右端の値である。

以上の手順が積算発電電力量を求める過程である。本論文では、この発電電力自動計算プログラムを発展させたものを用いて、積算発電電力量の予測を行う。

付録 C. 太陽電池の等価回路と出力電力

C.1 太陽電池の簡略化等価回路

太陽電池の簡略化した等価回路は図 C-1 に示すとおり、電流源とダイオードで構成される。短絡電流 I_0 は太陽の放射強度に比例する。 R は負荷抵抗である。

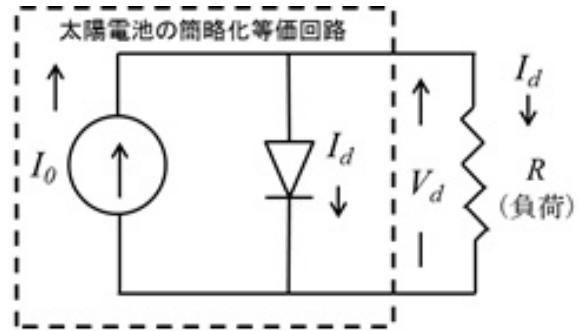


図 C-1 太陽電池の簡略化等価回路

C.2 動作直線、動作点そして出力電力

図 C-1 の回路の回路方程式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} I_0 &= I_d + I_R, \quad I_R = V_d/R \\ \therefore I_d &= I_0 - V_d/R \end{aligned} \quad (C-1)$$

式 (C-1) を図 C-2 に示す $V_d - I_d$ 図面に書き込んだものを動作直線という。これとダイオード特性曲線との交点が動作点である。動作点に対応する V_d と I_d の値を、それぞれ、 V_{d0} および I_{d0} とする。太陽電池の実際の出力電圧と出力電流は V_{d0} および I_{R0} ($= I_0 - I_{d0}$) である。出力電力は両者の積であって、面積 $V_{d0} I_{R0}$ ($= V_{d0} (I_0 - I_{d0})$) である。

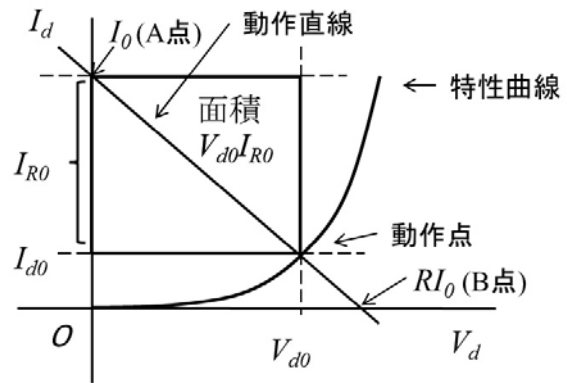


図 C-2 動作直線、動作点および出力電力

C.3 最適負荷抵抗

負荷抵抗値を 0 から増大させると、図 C-2 中の B 点は原点から V_d 軸を右側に移動する。その結果として、出力電力である面積 ($V_{d0} I_{R0}$) が変化することが分かる。太陽電池 HIP5517 のダイオード特性曲線を測定して、上述の手順で得た出力電力の一例が図 C-3 に示されている。最大出力電力を与える負荷抵抗が 1 つあることが分かる。これを「最適負荷抵抗」と呼んでいる。

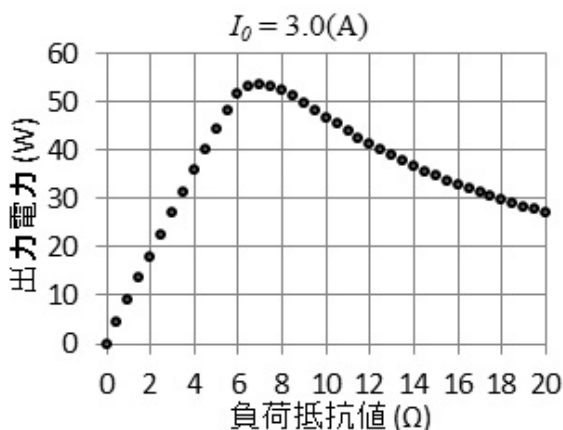


図 C-3 最大出力電力と最適負荷抵抗

付録 D 二分法による最適負荷抵抗の自動計算

D.1 太陽電池のダイオード特性曲線の数式化

前節で示した出力電力の手動計算を自動計算にするにはダイオード特性曲線の数式化は不可欠である。図 D-1は前述の HIP5517のダイオード特性曲線を片対数グラフに乗せたものである。端子間電圧が低い領域では直線近似ができること、高い領域では二次曲線近似ができること、が分かる。これらの結果を用いると、特性曲線 $f_2(V_d)$ の近似式が得られる。

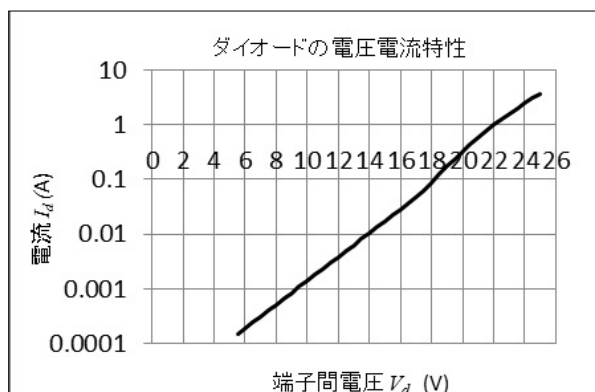


図 D-1 片対数図表上のダイオードの電圧電流特性

$$\begin{aligned} \log I_d &= \log f_2(V_d) = 0.2188846189 V_d - 5.0383843462 \\ & : V_d < 18 \text{ (V)} \\ \log I_d &= \log f_2(V_d) = -0.0111779937 V_d^2 + \\ & 0.7104257183 V_d - 10.2167637639 \\ & : V_d > 18 \text{ (V)} \end{aligned} \quad (D-1)$$

D.2 動作点を自動的に決定する方法の概要

式(C-1)の動作直線を $f_1(V_d)$ とする。この $f_1(V_d)$

と特性曲線 $f_2(V_d)$ の交点が動作点である。今、

$$f(V_d) = f_1(V_d) - f_2(V_d) \quad (D-2)$$

と置く。 $f(V_d)$ は、図 D-2に示すように、動作点の左側では正、そして、右側では負の値をとることが分かる。この事実を利用して動作点の位置を決定する。

図 D-2のように、初期値 V_1 と V_5 を $f(V_1) > 0$ および $f(V_5) < 0$ となるように設定する。 $V_3 = (V_1 + V_5) / 2$ とし、 $f(V_3)$ の大きさを計算する。図では $f(V_3) > 0$ であるから、動作点は V_3 と V_5 の間にあることになる。そこで V_3 を改めて V_1 と置きなおす。この新 V_1 と V_5 を初期値として上述の計算を繰り返す。すると、新 V_1 と V_5 の中点は図 D-2の V_4 になるが、 $f(V_4) < 0$ である。そこで V_4 を新 V_5 と置き直す。動作点は新 V_1 と新 V_5 の間に存在する。

初期値を2度変更したが、その結果、動作点の存在領域の幅は $2^{-2} (=1/4)$ に狭められたことになる。この手順を踏めば、必要な精度で動作点の位置を決定できる。この方法を「二分法」と呼んでいる。

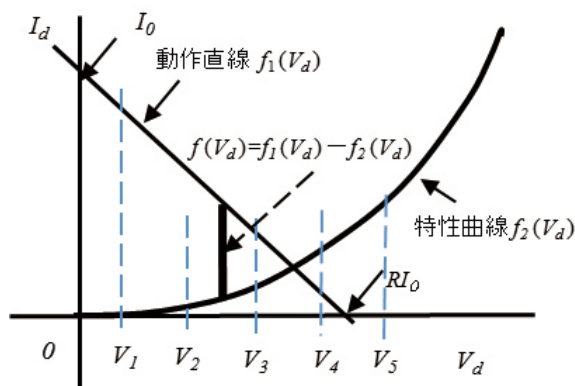


図 D-2 「二分法」による動作点の決定

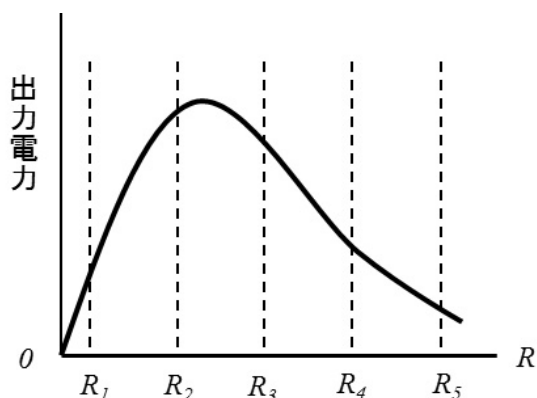
D.3 二分法による最適負荷抵抗と最大出力電力の決定

I_0 を一定に保ち、負荷抵抗値を変化させると、出力電力は、図 D-3のように、ある1つの抵抗値のとき最大値をとる。この抵抗を最適負荷抵抗と呼ぶことは前述したが、その決定法にも二分法が適用できる。

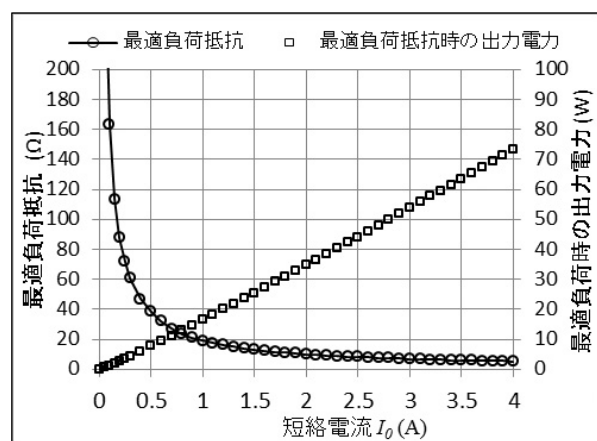
最大値を遠く離れていると考えられる領域に R_1 と R_5 を初期値として設定する。区間 $[R_1, R_5]$ を図 D-3のように4等分して、 R_2, R_3 および R_4 を配置する。これら5つの抵抗値における出力電力を計算して、最大値を与える抵抗 R_x を求める。最適負荷抵抗はこの R_x の両側の抵抗で挟まれた領域に存在する。図 D-3の

例でいえば $R_x=R_2$ であるが、それは $[R_1, R_3]$ の範囲に存在する。これを改めて $[R_1, R_3]$ として、ここを4等分する。上述の計算を繰り返すと、最適負荷抵抗が存在する領域幅が初めの1/4に狭められる。この手順を繰り返せば、必要な精度で最適負荷抵抗値と最大出力電力が決定できる。

図D-4はSANYO製の太陽電池HIP5517の最適負荷抵抗を短絡電流 (I_0) の関数として求めた結果を示している。同時に、このとき得られる最大出力電力も書き込まれているが、それは短絡電流 I_0 にはほぼ比例することが分かる。 I_0 は太陽光強度に比例するので、太陽電池の最大出力電力は太陽光強度に比例するといえる。



図D-3 二分法による最適負荷抵抗値の決定法



図D-4 太陽電池HIP5517の最適負荷抵抗値と最大出力電力

(平成25年9月30日受理)