

垂直設置太陽電池に対する雪面反射日射の効果

The effect of solar radiation reflected from snow surface on vertically installed photovoltaic

一戸 善弘* 矢神 雅規* 三澤 顕次* 魚住 昌広**

Yoshihiro Ichinohe, Masaki Yagami, Kenji Misawa, Masahiro Uozumi

Abstract

This paper discusses the solar radiation incident on the vertical plane. From the results of the analysis of the measured solar radiation on cloudy days in both summer and winter, it becomes clear that the value of the solar radiation incident on the vertical plane on cloudy days is determined mainly by the value of the horizontal-plane scattered solar radiation. This is because the reflected solar radiation from the ground is small due to a little direct solar radiation incident on the ground on cloudy days. However, in winter, the effect of the reflected solar radiation on the solar radiation incident on the vertical plane becomes larger than that in summer because the solar altitude is low and the reflection coefficient is large due to the snow covered the ground.

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地に設置される太陽電池は、電力需要の多い冬季の設備利用率を高めるために傾斜角を大きくして運用されることがある。北海道科学大学では、積雪防止と壁面スペースの有効利用を目的にアリーナ（体育館）の壁面（地面と垂直）に太陽電池を設置している。このような傾斜角の大きな太陽電池では、パネルに入射する直達日射量と散乱日射量が減少し、反対に地面からの反射日射量が増加するなどして発電量を推定するために必要な傾斜面日射量の推定が難しくなる。特に地面からの反射日射量については、地表面の状態が反射係数が変わりその影響を受けて変化するため、傾斜面日射量の推定をより難しくする。

そこで本紀要では、傾斜角の大きな太陽電池でも発電量を精度よく推定するための手法を構築するための基礎研究として、アリーナで実際に測定した垂直面日射量に基づいて、垂直面に入射する雪面反射日射量の影響を検討したので報告する。

〈2.1〉 傾斜面日射量の推定

一般に傾斜面日射量 H_S は式(1)で表される。ただし、日射量に関しては水平面・傾斜面、直達・散乱・反射を問わず単位は全て同じで、例えば MJ/m²/hr である。

$$H_S = D_S + S_S + R_S \quad (1)$$

ここで D_S : 傾斜面直達日射量、 S_S : 傾斜面散乱日射量、 R_S : 反射日射量である。傾斜面直達日射量 D_S 、傾斜面散乱日射量 S_S 、反射日射量 R_S は式(2)～(4)で求められる。ただし、式(4)は地表面が完全拡散の場合であり、傾斜面散乱日射量の影響は考慮していない。また、地上からの反射と雲などによる多重反射の影響も考慮していない。

$$D_S = D(\cos a \sin b + \sin a \cos b \cos \theta) \quad (2)^{(1)}$$

$$S_S = S_H(1 + \cos a)/2 \quad (3)$$

2. 傾斜面日射量について

* 北海道科学大学工学部電気電子工学科

** 北海道科学大学工学部建築学科

$$R_S = rD \sin^2(a/2) \quad (4)$$

ここで D : 太陽に正対する面の直達日射量、 a : 斜面勾配[rad]、 b : 仰角(太陽高度)[rad]⁽²⁾、 θ : 太陽方位と壁面がなす角度[rad]、 S_H : 水平面散乱日射量、 r : 地表面の反射係数である。ただし、地面に対して垂直面に当たる日射量を推定するため、斜面勾配 a は 90 度となる。そのため、式(2)~(4)は以下のようになる。

$$D_S = D \cos b \cos \theta \quad (5)$$

$$S_S = S_H / 2 \quad (6)$$

$$R_S = rD / 2 \quad (7)$$

また、太陽に正対する面の直達日射量 D は式(8)から求められる。

$$D = D_H / \sin b \quad (8)$$

ここで D_H : 水平面直達日射量である。一方、全天日射量 H は式(9)で表される。

$$H = D_H + S_H \quad (9)$$

多くの気象観測所では全天日射量 H のみが測定されている。そのため傾斜面日射量の推定には全天日射量 H から水平面直達日射量 D_H と水平面散乱日射量 S_H に直散分離する必要がある。この直散分離を行なうためのモデルは、Erbs⁽³⁾ らや Perez⁽⁴⁾ らなどによりすでに数多く報告されており、その多くは全天日射量 H から水平面散乱日射量 S_H を求める関数を決定するものになる。これらのモデルは過去の長期的な統計データに基づいて作成されたものが多い。そのため、1時間や1日単位など短期の推定に用いる場合は誤差が大きくなる可能性がある。そこで、本紀要では直散分離を行わずに、太陽と正対する面の直達日射量 D と水平面散

乱日射量 S_H の測定値を用いて検討を行う。これにより、全天日射量 H は式(8)と(9)より式(10)で表すことができる。

$$H = D \sin b + S_H \quad (10)$$

<2.2> 日射量の測定

全天日射量の測定は大学の屋上(北緯43.13度、東経141.25度)に設置されている全天日射計で行い、測定データの評価のために札幌管区気象台(北緯43.06度、東経141.33度)で測定された全天日射量も使用した。また、傾斜面日射量の測定は、アリーナの壁面(南西向き)、地上高13.5mに設置されている全天日射計を用いた。日射量の推定に必要な太陽と正対する面の直達日射量と水平面散乱日射量は、札幌管区気象台の測定値を用いた。

3. 傾斜面日射量の推定

<3.1> 各日射量の計算に関する問題点

正確な各日射量の計算を行うためには、時間毎の日射量と仰角、太陽方位が必要である。しかし、大学での測定値を含め、一般に取得可能な日射量の多くが、1時間ごとの積算値であるため、仰角に用いる値については注意が必要である。例えば7時から8時の日射量の積算値を8時のデータとすると、仰角は7時の値、8時の値、7時から8時の平均値など、どの値を用いるのが適正か判断が難しい。そこで、まず仰角について検討を行う。通常であるならば太陽高度の関係から夏至(2013年6月21日)と冬至(2013年12月22日)について考えるべきだが、天候(日射量)の関係から2013年6月12日と2013年12月14日について検討を行う。図1に2013年6月12日の札幌管区気象台の全天日射量の測定値(実線)、式(10)より求めた全天日射量(長鎖線)を示す。この日は快晴で気温14.2~23.6℃、風速約6m/sである。計算に用いた仰角は各時刻のものである。

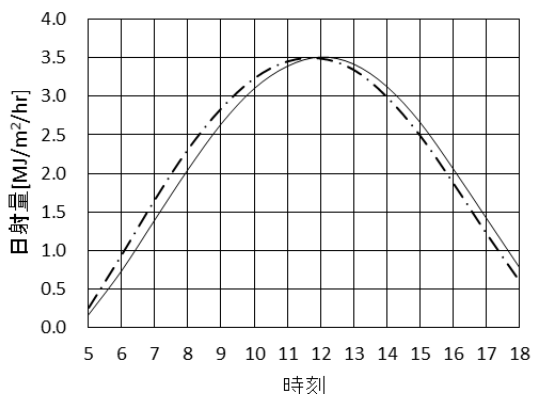


図1 2013年6月12日の全天日射量

縦軸の日射量は横軸の時刻の前1時間分の積算値（例えば、8時の値は7時～8時までの積算値）である。測定値と計算値を比較すると計算値は測定値を左にシフトした形になっていることがわかる。これはある時刻において、仰角として用いた値よりも前の時刻の仰角が適正ということを示している。例えば7時～8時の積算値に対して8時の仰角を用いるのではなく、8時より前の時刻の仰角を用いるべきということである。そこで、図2に日射量の測定値（実線）、30分前の仰角で計算した値（破線）、1時間の仰角の平均を用いて計算した値（点線）を示す。

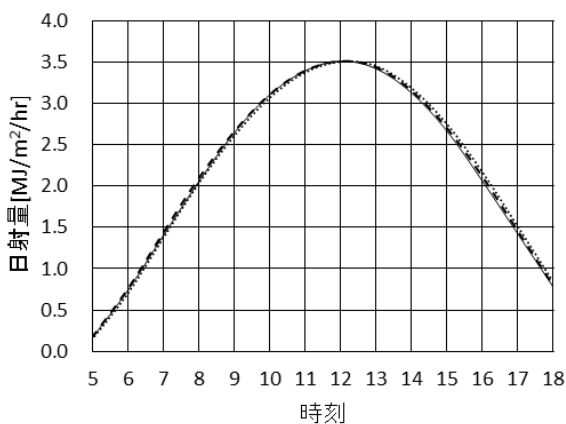


図2 仰角を変更したときの計算値との比較

3本のカーブが重なって判別しにくい結果となり、30分前の仰角を用いて計算したものと、1時間の平均仰角を用いて計算したもののどちらも、測定値とほぼ一致することがわかる。そこで、図3に30分前の仰角で計算した値の誤差率（破線）、1時間の仰角の平均を用いて計算した値の誤差率（点線）を示す。

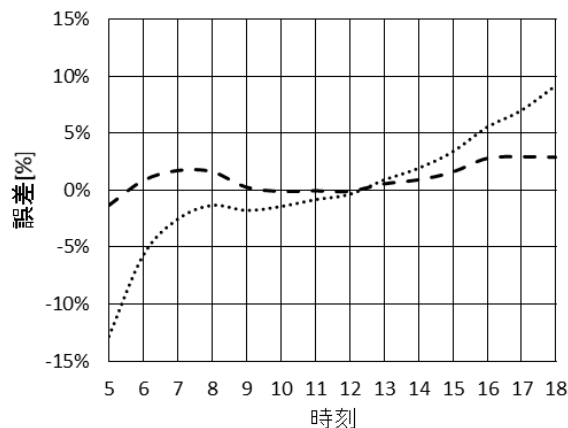


図3 夏季の全天日射量の測定値との誤差

それぞれの2乗平均平方根誤差は30分前の仰角を用いた計算では1.6%、1時間の平均仰角を用いた計算では5.3%である。このグラフから30分前の仰角を用いて計算したほうが、1時間の平均仰角を用いて計算するよりも精度がよいことがわかる。また、日中に比べ、朝方、夕方の誤差が大きくなる傾向が見られる。これは朝方、夕方は日射量の絶対値が小さいため、わずかな誤差でも大きく見えることが考えられる。また、仰角は南中に向かうにつれ変化が小さくなるが、式(8)のsin関数は角度が小さいほうが、角度の変化に敏感であることが挙げられる。次に、図4に2013年12月14日について30分前の仰角を用いた計算値の誤差（破線）と1時間の平均仰角を用いた計算値の誤差（点線）を示す。この日は快晴で気温 $-4.8 \sim -1.1^{\circ}\text{C}$ 、風速約4m/s、最大積雪深が約14cmである。

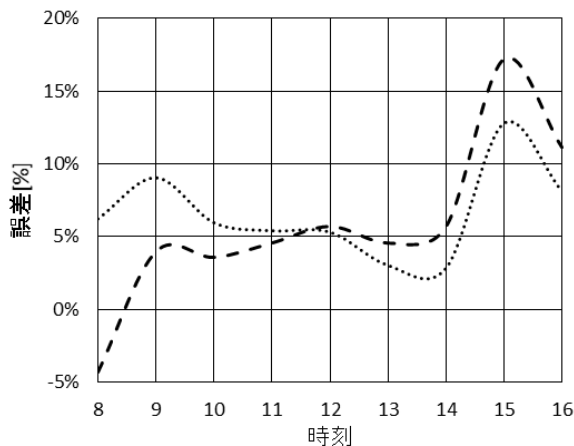


図4 冬季の全天日射量の測定値との誤差

夏季と同様に朝方、夕方の誤差が大きいことがわかる。2乗平均平方根誤差は30分前の仰角を用いた計算では8.0%、1時間の平均仰角を用いた計

算では7.1%となり、夏季とは反対に1時間の平均仰角を用いた計算のほうが誤差は小さくなったが、それほど大きな差は現れなかった。そのため、これ以降の解析においては時刻の30分前の仰角を用いることにする。

〈3.2〉 2013年6月12日快晴時の日射量

表1に時刻と仰角、方位（南西45度を基準）を示す。また、図5に2013年6月12日の札幌管区気象台の全天日射量（実線）、本学屋上の全天日射量（破線）、本学アリーナ壁面の傾斜面日射量（長鎖線）、傾斜面直達日射量計算値（斜線部）、傾斜面散乱日射量計算値（黒塗）を示す。

表1 2013年6月12日の仰角と方位

時刻	仰角[deg.]	太陽方位[deg.]
5:00	14.84	-63.04
6:00	25.47	-53.71
7:00	36.39	-43.89
8:00	47.26	-32.46
9:00	57.55	-17.29
10:00	66.09	5.99
11:00	70.13	41.98
12:00	67.07	79.48
13:00	58.99	104.50
14:00	48.85	120.53
15:00	38.03	132.34
16:00	27.10	142.32
17:00	16.41	151.68
18:00	6.29	161.14

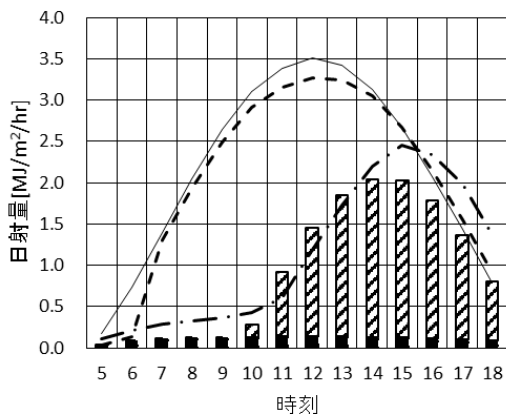


図5 2013年6月12日の日射量

札幌管区気象台の全天日射量（実線）で示され

る面積は30.51 MJ/m²、本学屋上の全天日射量（破線）で示される面積は28.80 MJ/m²であり、ほぼ同じであるので、他の日に対する解析では札幌管区気象台の値のみを示すことにする。同様に、札幌管区気象台と本学屋上において太陽に正対する面の直達日射量と水平面散乱日射量も同じであると考えられる。壁面の傾斜面日射量（長鎖線）で示される面積は15.59 MJ/m²であり、この日の総日射量は全天日射量のほうが傾斜面日射量よりも大きくなった。また、反射日射量を含んでいない傾斜面日射量の計算値（棒グラフの総和）は13.03 MJ/m²であり、傾斜面日射量の測定値よりも小さい。

次に各時刻について検討を行う。まず5時～9時に関しては、直達日射量はすべて0である。これは壁面を基準とすると太陽方位となす角度が負であり、式(5)が負になるため、0としているためである。11時～13時であるが、計算値（棒グラフ）のほうが測定値よりも大きくなっている。これは、11時～13時は太陽方位の変化が1時間あたり30度を越えており、〈3.1〉で示した時刻の30分前の角度を用いるのでは予測には不適切であることを示唆している。そのため、より精度を向上させるためには毎時の日射量の積算ではなく、より短い測定周期のデータが必要であると考えられる。14時～18時についてだが、どの時間でも計算値（棒グラフ）が測定値に達していない。計算値は傾斜面直達日射量と傾斜面散乱日射量の和であるが、式(1)で示したように、実際には反射日射量も存在する。そのため計算値と測定値の差は反射日射量と考えられる。特に傾斜面日射量が最も大きい15時について着目すると、計算値と測定値の差は0.42 MJ/m²/hrとなる。このときの太陽に正対する面の直達日射量は3.27 MJ/m²/hrであるので、式(7)から地表の反射係数 r は25.6%と求まる。これは舗石、アスファルトの反射率(15～30%、15～20%)⁽⁵⁾とほぼ一致することから、計算値との差は地表からの反射日射量であると言える。なお、散乱光による反射は〈2.1〉で述べたとおり、考慮していないが、後述の〈3.3〉で説明するように、大きな影響はないと考えられる。また、13時より前の時刻においても、反射日射量は存在するはずであるが、壁面から南の方角には建物があるため、太陽方位が90度（南西）を超えるまでは、影響が小さかったのではないかと考えられる。

〈3.3〉 2013年6月20日曇天時の日射量

図6に2013年6月20日の札幌管区気象台の全天日射量（実線）、本学アリーナ壁面の傾斜面日射量（長鎖線）、傾斜面散乱日射量計算値（黒塗）を示す。この日は曇天で降水量は1mm以下、気温14.3～17.8℃、風速約5m/sで日照時間は0.2時間以下である。

札幌管区気象台の全天日射量で示される面積は12.99 MJ/m²、壁面の傾斜面日射量で示される面積は5.44 MJ/m²であり、この日の総日射量は全天日射量のほうが傾斜面日射量よりも大きくなった。また、傾斜面日射量の計算値の総和は6.04 MJ/m²であり、測定値よりも大きくなった。次に各時刻に関してだが、直達日射量はすべての時刻でほぼ0である。これは太陽と正対する直達日射量の測定値が0のためである。そのため、式(1)は式(6)より水平面散乱日射量の1/2と反射日射量になるが、水平面散乱日射量の1/2と傾斜面日射量がほぼ一致するので、反射日射量は、ほとんど無いことがわかる。これにより式(1)の反射日射量は夏季においては直達日射量に起因するところが主であると考えられ、反射日射量に対する多重散乱日射量などを考慮しなくても影響が少ないと考えられる。

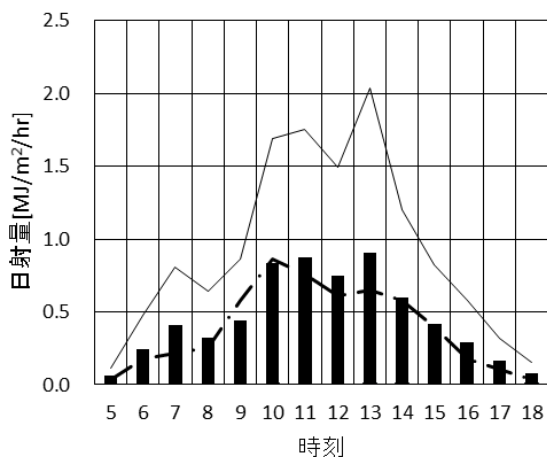


図6 2013年6月20日の日射量

〈3.4〉 2014年2月24日快晴時の日射量

表2に時刻と仰角、方位（南西45度基準）を示す。また、図7に2014年2月24日の札幌管区気象台の全天日射量（点線）、本学アリーナ壁面の傾斜面日射量（長鎖線）、傾斜面直達日射量計算値（斜線部）、傾斜面散乱日射量計算値（黒塗）を示す。この日は最大積雪深が約1m、快晴、気温-8.0～

+2.2℃、風速約1m/sである。

札幌管区気象台の全天日射量で示される面積は14.65 MJ/m²、壁面の傾斜面日射量（長鎖線）で示される面積は16.34 MJ/m²であり、この日の総日射量は傾斜面日射量のほうが大きくなった。また、傾斜面日射量の計算値の総和は16.25 MJ/m²であり、測定値のほうが大きくなった。特に傾斜面日射量が最も大きい15時について着目すると、計算値（棒グラフ）と測定値の差は0.56 MJ/m²/hrとなる。このときの太陽に正対する面の直達日射量は2.73 MJ/m²/hrであるので、式(7)から雪面の反射係数 r は41.0%と求まる。これは古雪の反射係数(40～70%)⁽⁵⁾とほぼ一致することから、計算値との差は雪面からの反射日射量がほとんどと言え、冬季の太陽高度が低いこととも合わせ、屋上の全天日射量より壁面の傾斜面日射量が多くなる要因になっていると考えられる。このため、水平より垂直に太陽光パネルを設置するほうが、太陽光発電には有利であることがわかる。

表2 2014年2月24日の時刻と仰角、方位

時刻	仰角[度]	太陽方位[度]
7:00	11.43	-20.18
8:00	20.83	-8.31
9:00	28.78	5.44
10:00	34.54	21.47
11:00	37.32	39.44
12:00	36.63	57.96
13:00	32.59	75.28
14:00	25.87	90.40
15:00	17.27	103.35
16:00	7.49	114.68
17:00	-3.09	125.06
18:00	-14.07	135.19

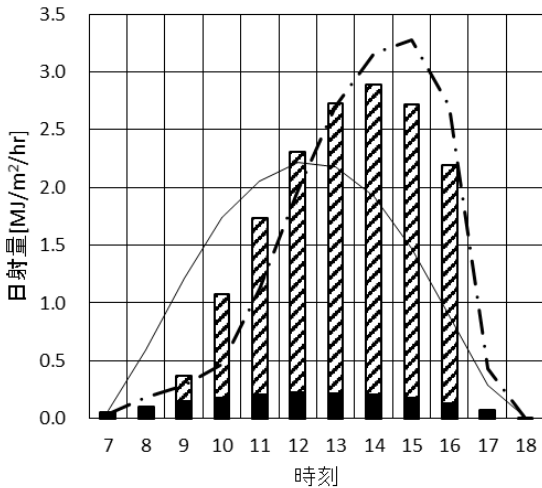


図7 2014年2月24日の日射量

〈3.5〉 2014年2月16日曇天時の日射量

図8に2014年2月16日の札幌管区気象台の全天日射量（実線）、本学アリーナ壁面の傾斜面日射量（長鎖線）、傾斜面散乱日射量計算値（黒塗）を示す。この日は最大積雪深が約79cm、曇天、降雪量6cm、気温 $-1.9 \sim +0.2^{\circ}\text{C}$ 、風速約6m/sで日照時間は0時間である。

札幌管区気象台の全天日射量で示される面積は 3.92 MJ/m^2 、壁面の傾斜面日射量（長鎖線）で示される面積は 2.23 MJ/m^2 であり、この日の総日射量は全天日射量のほうが大きくなった。また、傾斜面日射量の計算値の総和は 2.07 MJ/m^2 であり、傾斜面日射量の測定値のほうが大きくなった。〈3.3〉の夏季における曇天時と同様に、式(6)とほぼ一致しており、積雪時においても反射日射量は直達日射が支配的であることがわかる。

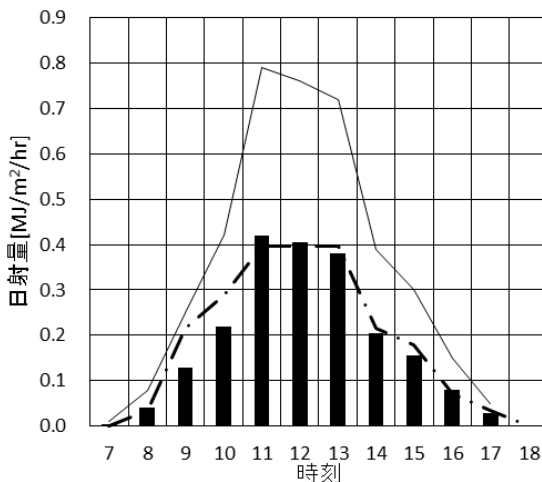


図8 2014年2月16日の日射量

4. まとめ

本紀要では、傾斜角の大きな太陽電池でも発電量を精度よく推定するための手法を構築するための基礎研究として、アリーナで実際に測定した垂直面日射量のデータを用いて垂直面に対する雪面からの反射日射量の影響を検討した。夏季および冬季の曇天時の日射量データより、壁面に対する散乱日射量の大きさは地表面からの反射の影響をほとんど受けず、式(3)で表される傾斜角度と水平面散乱日射量によってほぼ決定付けられることがわかった。また、夏季・冬季ともに反射日射量の大部分は直達日射に依るものであることも分かった。これらのことから直達日射量がほとんどない曇天時には、垂直面に入射する日射量の大部分が水平面散乱日射量であると考えられる。

次に夏季の晴天時には、地表面からの反射日射量を考慮しても、水平面日射量の方が傾斜面日射量よりも大きくなることが分かった。これは太陽高度が高いため、直達日射量を多く受けられる水平面の方が一日の総日射量が多くなるためである。一方、冬季においては、水平面よりも壁面の傾斜面日射量が多くなる。これは冬季の太陽高度が低いことと、雪面からの反射日射量が大きいためだと考えられる。

なお、本紀要では、毎時の積算日射量データを用いて垂直面に入射する日射量について検討したが、仰角のデータが瞬時値であることから、より短い測定周期のデータを用いることで推定精度を高めることができると考えられる。

5. 参考文献

- (1) 日本太陽エネルギー学会編,「太陽エネルギー—読本」,1978,p.21
- (2) 長沢工,「日の出・日の入りの計算」,地人書館,1990,pp.51-80
- (3) D. G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie, "Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation", Solar Energy. vol. 28, 1982, pp. 293-302.
- (4) Perez, R.R, Seal, R.D, Maxwell, E.L, Zalenka, A., "Dynamic global-to-direct irradiance conversion models", ASHRAE Transactions. vol. 98, 1992, pp. 354-369.
- (5) 「建築学大系22 室内環境計画」, 彰国社, 1969, p.213