

【4-19】

積雪地域における太陽光発電の利用可能性に関する研究（その2）
パネル上の積雪のモデル化と発電量への影響評価

正会員 ○富永 禎秀*1
会員外 寺岡 亮太*2

太陽光発電 シミュレーション
傾斜角 積雪地域 発電量

1. 研究目的

現状では、新潟県をはじめとして積雪地域における住宅用太陽光発電設備の普及率は非常に低い^{1,2)}。これは、積雪地域である日本海側地域は冬季に曇天が多いため日照時間自体が短いことと、また太陽光パネル上に積雪してしまうと、降雪時に発電しないだけでなく、降雪後の晴天日にも遮光され発電できないという課題を反映しているものと考えられる。しかしながら積雪地域には、それ以外の地域に比べて春季・夏季の日照時間がむしろ長い地域も多く、太陽光発電の将来的なさらなる普及を図るためには、日本の国土の約6割を占める積雪寒冷地域での利用を如何に進めていくかが重要である。

本研究では、太陽光パネルの設置角度による落雪効果、パネルに積もった雪の挙動、積雪からの反射光など、積雪・気象条件による発電効率の影響を、実測と数値シミュレーションにより明らかにすることを目的とする。

2. 積雪時の太陽光発電に関する実測調査

1) 太陽光パネル

シャープ製太陽電池 NE-70A1T（最大出力：84.0[W]，モジュール寸法（mm）H×W×D：1200×530×35）を新潟工科大学北棟屋上に設置した。設置状況を写真1に示す。パネルの設置方位は南、設置角度は45°とした。

2) 発電量の測定

太陽光パネルからの出力に、シャント抵抗器（分流器）及び負荷抵抗を接続し、電圧[V]及び電流[A]をデータロガーにより記録した。その結果からオームの法則により電力[W]を求めた。またパネル上の積雪状況を Webカメラを用いて連続的に撮影・記録し、整理した。

3) 気象データの測定

太陽光パネル付近に設置した観測装置により、全天日射量、風向・風速、温湿度を10分間隔で計測した。

3. 太陽光発電量シミュレーションの概要

3-1 斜面全天日射量の算出³⁾

発電量シミュレーションを行う場合、気象観測データあるいは実測から得られる水平面全天日射量 J_h から斜面全天日射量 J_θ への変換が必要である。水平面全天日射量 J_h は水平面直達日射量 J_{dh} と水平面天空日射量 J_{sh}

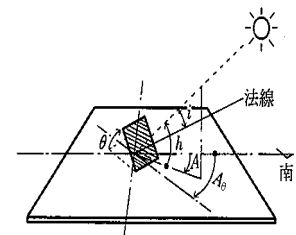


図1 太陽光パネル設置状況 図2 斜面日射量の計算³⁾

に分離できる。

$$J_h = J_{dh} + J_{sh} \quad (1), \quad J_{dh} = J_{dn} \sinh \quad (2)$$

h : 太陽高度 (図1 参照)

法線面直達日射量 J_{dn} は、Bourguer の式により、次式で求めた。

$$J_{dn} = J_0 P \frac{1}{\sinh} \quad (3)$$

J_0 : 太陽定数 1,353 [W/m²]

水平面天空日射量 J_{sh} は Berlage の式より、

$$J_{sh} = \frac{1}{2} J_0 \sinh \frac{1 - P \sinh}{1 - 1.41 \ln P} \quad (4)$$

(1)式に(2)～(4)式を代入し、 J_h に既知の水平面全天日射量を与え、両辺が等しくなるように繰り返し計算で大気透過率 P を求めた。その P を用いることによって、 J_{dh} と J_{sh} を得る。その結果に基づき、斜面全天日射量 J_θ を以下のように計算する。

$$J_\theta = J_{d\theta} + J_{s\theta} + J_{r\theta} \quad (5)$$

$J_{d\theta}$: 斜面直達日射量, $J_{s\theta}$: 斜面天空日射量

傾斜面直達日射量 $J_{d\theta}$ は以下のように求める。

$$J_{d\theta} = J_{dn} \cos i \quad (6)$$

i : 傾斜面に対する日射の入射角

$$\cos i = \cos \theta \sinh + \sin \theta \cosh \cos(A - A_0) \quad (7)$$

A : 太陽方位角, A_0 : 傾斜面の方位角

斜面天空日射量 $J_{s\theta}$ は、天空が等輝度拡散面とすれば、その面からみた天空の形態係数に比例し、次式で求められる。

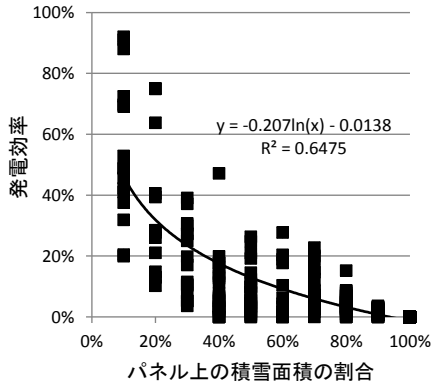


図3 積雪が発電量に及ぼす影響

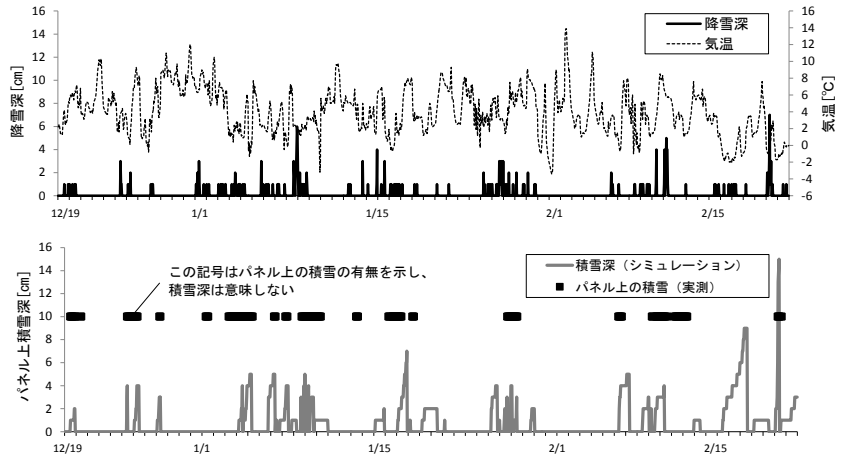


図4 パネル上積雪深のシミュレーション結果と気象条件

$$J_{s0} = \frac{1 + \cos \theta}{2} J_{sh} = \cos^2 \frac{\theta}{2} J_{sh} \quad (8)$$

傾斜角 θ の傾斜面の反射日射量は次式で求めた。

$$J_{r0} = \left(1 - \frac{1 + \cos \theta}{2}\right) \rho_G J_h \quad (9)$$

ρ_G : 地面の日射反射率 (アルベード)

3-2 推定発電量の算出

推定発電量 X [kW] は、 J_0 より次式で求める。

$$X = J_0 \cdot \rho \cdot K_1 \cdot K_2 / 1000 \quad (10)$$

ρ : 定格発電効率

K_1 : 汚れ等による補正係数(本研究では 0.95 と仮定)

K_2 : パネルの温度により発電量の効率に影響を及ぼす補正係数^{注1)}

表1 パネル傾斜角度別の限界積雪深¹⁾

パネル傾斜角度	0°	33°	45°	60°	90°
限界積雪深 [cm]	なし	15	10	5	0

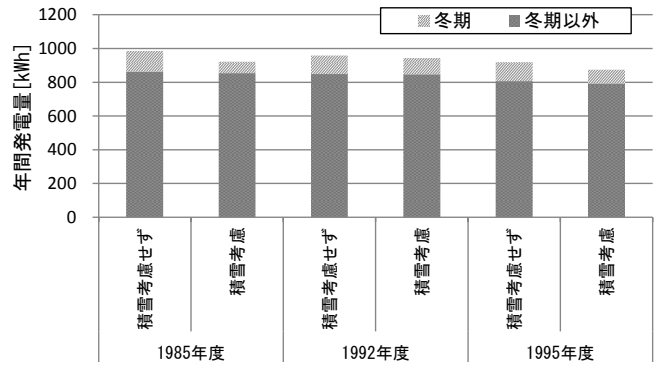


図5 年度別の年間発電量の比較

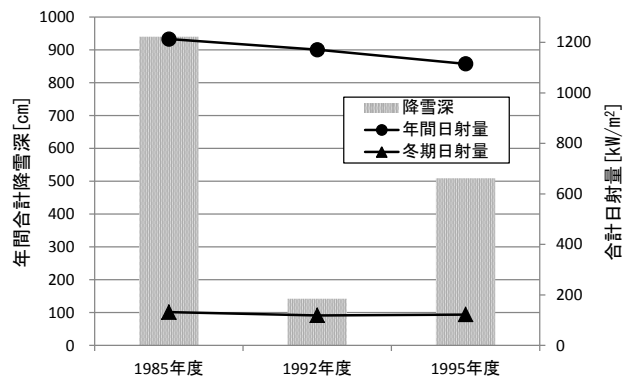


図6 年度別の合計降雪深と合計日射量の比較

4. 実測結果に基づくパネル上積雪のモデル化検討

4-1 積雪時の発電量に関する実測結果

図3は、パネル上に積雪している際のパネル面積に対する雪に覆われた面積の割合 (Web カメラの画像より目視で算定) と、そのときの発電効率 (積雪がない場合に日射量から推定される発電量に対する実際の発電量の割合) の関係を示したものである。パネル上に積雪がある場合、急激に発電量が低下し、積雪面積割合が 100% の場合、パネル上の積雪深とは関係なく、発電はゼロとなることが確認できる。

4-2 パネル上の積雪のモデル化

降雪時には、パネル上には地表面と同様に積雪し、ある積雪深 (限界積雪深) に達した時に、落雪するものとする。限界積雪深は、パネルの傾斜角度によって表1のように変化するものとする⁵⁾。なお本研究では気温の影響を考慮し、以下のように落雪条件を設定した。

- ① 気温 1°C 以上で限界積雪深に達した場合
- ② 気温 2°C 以上で限界積雪深の半分に達した場合
- ③ 気温 5°C 以上の場合

また自然融雪を考慮し、地上積雪深と同じ減少率でパネル上積雪深も減少するものとした。パネル上に積雪している期間は積雪深に係わらず発電量を 0 とする。

4-3 モデル化の検証

今回の実測期間の気象条件に上記のモデルを適用して得られたパネル上積雪深と、実際のパネル上の積雪状況の関係を図4に示す。降雪深については、最寄りのアメダス観測点 (柏崎; 実測場所から約 3km) のデータを使用した。パネル上に積雪する期間を概ね精度よく再現していると判断できる。2月15日付近で、シミュレーション結果で、実際にはないパネル上の積雪が見られる。これはこの期間にアメダスデータではまとまった降雪が

見られるのに対して、実測地点では降雪が観測されなかったことによる。

5. 積雪時の発電量に関する数値シミュレーション

5-1 共通する解析条件

1) シミュレーションの条件設定

- ・パネル定格発電効率：1kW
- ・パネル設置方位：南
- ・周辺積雪面のアルベード：0.7（無雪時は0.1）

2) 気象データ

シミュレーションで必要となる水平面全天日射量、気温、絶対湿度については、日本建築学会・拡張アメダス気象データ⁶⁾を使用した。降雪深、積雪深は、気象庁の気象統計情報のデータを用いた。

5-2 積雪条件の違いが年間発電量に及ぼす影響

1) 解析条件

- ・パネル傾斜角度：33°
- ・設置地点：柏崎
- ・対象年度：1985年度（豪雪年）、1992年度（少雪年）、1995年（平年並）

2) 解析結果

年間降雪量の異なる3つの年度において、積雪が太陽光発電量に及ぼす影響を比較したのが図5である。各年度の年間合計全天日射量と年間合計降雪深を図6に示す。冬期の合計日射量には大きな違いが無いにも関わらず、年間降雪量に比例する形で、積雪を考慮することによって発電量が減少している。積雪の影響によって各年度で約2~6%の年間発電量の違いがみられる。しかしながら、冬期（12, 1, 2月）に限れば、積雪を考慮することによる予測発電量の差は、約12~82%と大きく、冬期の発電量の予測を正確に行うためには、積雪を適切に考慮することが重要であることが分かる。またこの発電量の差が、パネル上の積雪に対して何らかの対処をする場合に投入できるコストの目安となる。

5-2 積雪地域の年間発電量に関する検討

1) 解析条件

- ・パネル傾斜角度：33°
- ・対象年度：1985年度（豪雪年）
- ・設置地点：柏崎（年間降雪深940cm）、小出（年間降雪深1,556cm）、東京（降雪なし）

2) 解析結果

図7に、パネル上の積雪を考慮したシミュレーションによる新潟県の2地点（柏崎、小出）の年間発電量の比較を示す。比較のため、同じ年度の東京の年間発電量のシミュレーション結果を示す。東京の年間発電量に対して、同年度の柏崎と小出の発電量は、それぞれ89%と85%であり、積雪地域であっても、発電量にはそれほど大きな差はないことが分かる。これは、年間発電量の内訳をみて分かる通り、冬期の日射量が少ないことによって発電量も小さいが、春から夏にかけての発電量が東

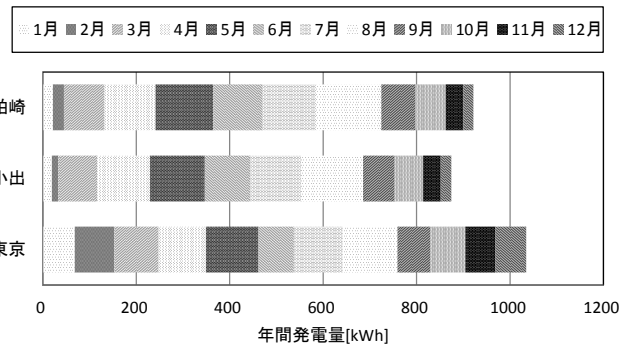


図7 地域による年間発電量の比較

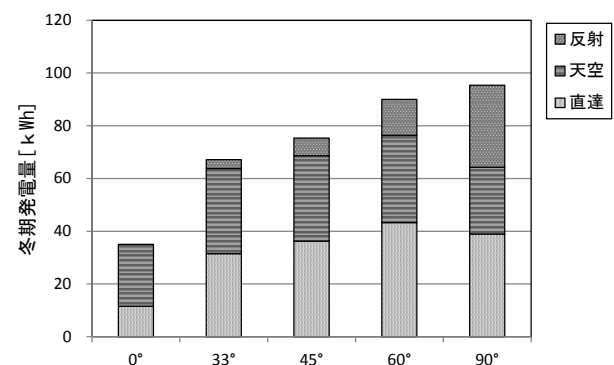


図8 パネル傾斜角度別の冬期発電量（成分別）

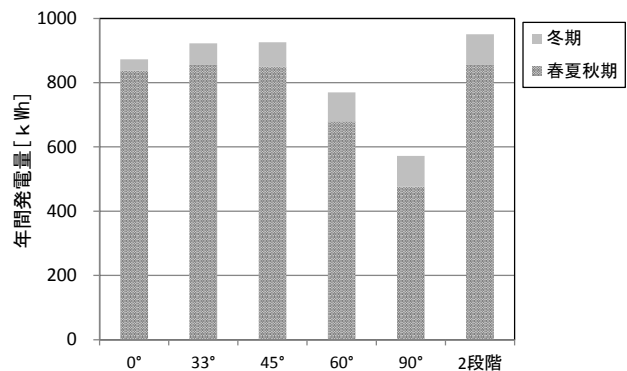


図9 パネル傾斜角度による年間発電量の比較

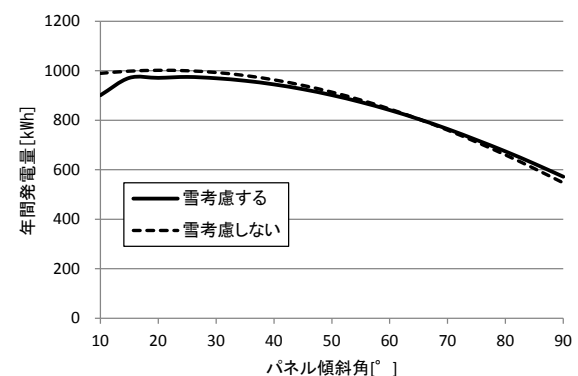


図10 傾斜角度別の年間発電量の比較

京に比べて多いため、年間の発電量としては大きな差とはならない。すなわち冬期の雪の対応を適切に行うことによって、積雪地域の太陽光発電の利用にも大きな可能性があることが示唆される。

5-3 パネルの設置角度が冬期の発電量に及ぼす影響

1) 解析条件

- ・パネル傾斜角度：0° ～ 90° ， 2段階（冬期のみ 90° でそれ以外は 33° ）
- ・設置地点：柏崎
- ・対象年度：1985 年度（豪雪年）

2) 解析結果

パネル傾斜角度を変化させた場合の冬期（12, 1, 2 月）の発電量を、成分別に図 8 に示す。合計発電量は、90° の場合が最も多い。角度が急になるに従い、反射成分が増加しており、90° の場合には、全体の約 3 割を占める。この点を踏まえて、冬期のパネル傾斜角を 90° とし、それ以外の期間は 33° とする 2 段階式の設置方法を想定したケースを図 9 中に示す。33° の場合に比べて年間発電量が約 3% 増加する結果となった。

しかしながら角度を変化させるような設置方法は、初期費用の増加が懸念されるため、角度は固定とした場合で、年間の発電量が最も大きくなる角度を検討した。図 10 は、パネル傾斜角度を段階的に変化させ、年間発電量を求めた結果である。傾斜角度別の限界積雪深は、表 1 の関係を近似関数で表現して与えた。積雪を考慮しない場合、20° 付近にピークが生じるのに対して、積雪を考慮した場合、発電量が最大となる角度が 25° とやや大きくなっており、雪を考慮することによって、最適な設置角度が異なる可能性が示唆される。

6. まとめ

- 1) 太陽光パネル上の積雪の挙動をモデル化する方法について検討するとともに、その有効性を実際の太陽光パネルを用いた実測結果によって検証した。
- 2) 上記のモデル化手法と気象データを用いた数値シミュレーションにより、積雪が年間発電量の予測結果に及ぼす影響は 2～6% 程度、冬期に限定すれば 12～82% 程度と試算された。
- 3) 冬期は、パネルの傾斜角度を大きくすることによって、パネル上に雪が堆積しないことと反射成分が大きくなることにより、90° の場合が最も発電量が多かった。また設置角度を季節によって変える 2 段階式、あるいは年間発電量を最大化する角度を決定する方法の有効性が示された。
- 4) 今後は、パネル上の積雪のモデル化の精度を向上させるとともに、多様な気象条件における適用性を検証していく必要がある。

謝辞 本研究の一部は、財団法人トステム建材産業振興財団（現 公益財団法人 LIXIL 住生活財団）の助成により行

われた。記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 細川和彦：積雪地域の太陽光発電，日本雪工学会誌，vol. 26, No. 2, 8-19, 2010. 4
- (2) 細川和彦，苔米地司：降雪を考慮した太陽電池の設置技術に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 16 巻，第 32 号，197-200, 2010. 2
- (3) 田中俊六，岩田利枝，寺尾道仁，武田仁，土屋喬雄：最新建築環境工学[改訂 3 版]，井上書院，2006. 03
- (4) 赤林伸一，坂口淳，佐々木淑貴，田村優佳：太陽光発電の地域特性に関するシミュレーション その 1 東北地方を対象とした発電量と暖房負荷の関係，日本建築学会北陸支部研究報告集，第 40 号，195-198, 1997. 7
- (4) 富永禎秀，杉山志織：積雪地域における太陽光発電の利用可能性に関する研究（その 1）太陽光パネル上の積雪を考慮した発電量シミュレーション，日本建築学会北陸支部研究報告集，第 55 号，315-318, 2012. 7. 22
- (6) 日本建築学会編：拡張アメダス気象データ 1981-2000, 2005. 8

注 1) パネルの温度により発電量の効率に影響を及ぼすパネル温度補正係数 K_2 は、文献 4 を参考に次式で計算した。

$$K_2 = -0.005t_s + 1.13 \quad (10)$$

t_s ：パネル表面温度

パネル表面温度 t_s は以下のように求めた。

$$t_s = t_a + \frac{1}{\alpha_c} (0.5J_\theta - J_{e\theta}) \quad (11)$$

J_θ ：斜面全天日射量 [W/m²]

$J_{e\theta}$ ：斜面実効放射量 [W/m²]

t_a ：気温 [°C]

α_c ：対流熱伝達率 (11. 6) [W/m²°C]

ただし $t_s \leq t_a$ の場合、 $t_s = t_a$ とした。

斜面実効放射量 $J_{e\theta}$ は、水平面実効放射量 J_{eh} と以下の関係にある。

$$J_{e\theta} = \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) J_{eh} \quad (12)$$

水平面実効放射量 J_{eh} は次式により求めた。

$$J_{eh} = (94.21 + 39.06\sqrt{e} - 0.85\sigma T_a^4) \times 1.16 \quad (13)$$

e ：水蒸気分圧 [hPa]

T_a ：外気絶対温度 [K]

σ ：Stephan-Boltzman 定数 (=4.88×10⁻⁸) [kcal/m²hk⁴]

e は相対湿度 RH 及び飽和水蒸気圧 e_s を用いて、次式で求める。

$$e = RH \times e_s \div 100 \quad [\text{hPa}] \quad (14)$$

なお飽和水蒸気圧 e_s は、Tetens の式を用いて、気温の関数として次式で与える。

$$e_s = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t_s}{(t_s+237.3)}} \quad (15)$$

*1 新潟工科大学建築学科・教授

Professor, Niigata Institute of Technology

*2 研究当時 新潟工科大学建築学科・学部生

Ex-Undergraduate Student, Niigata Institute of Technology