

【4-8】

## 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

Study on the Availability of Photovoltaic in Snowy Region: Part 1

Energy production simulation considering the influence of snow on photovoltaic panel

富永 禎秀\*1

Yoshihide Tominaga

杉山 志織\*2

Shiori Sugiyama

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の第一段階として、太陽光パネル上の積雪の影響を考慮した発電量のシミュレーション手法を提案し、新潟県・柏崎を事例として、年間の発電シミュレーションを実施した。その結果、太陽光パネルの傾斜角を急勾配にすることによって、落雪が促進され、冬期の発電量の増加が見込まれることが明らかになった。しかし、冬期の日射量自体が少ない場合、年間の発電量に与える影響は小さいため、設置する建物の電力需要状況あるいは売電計画と併せて考慮する必要がある。

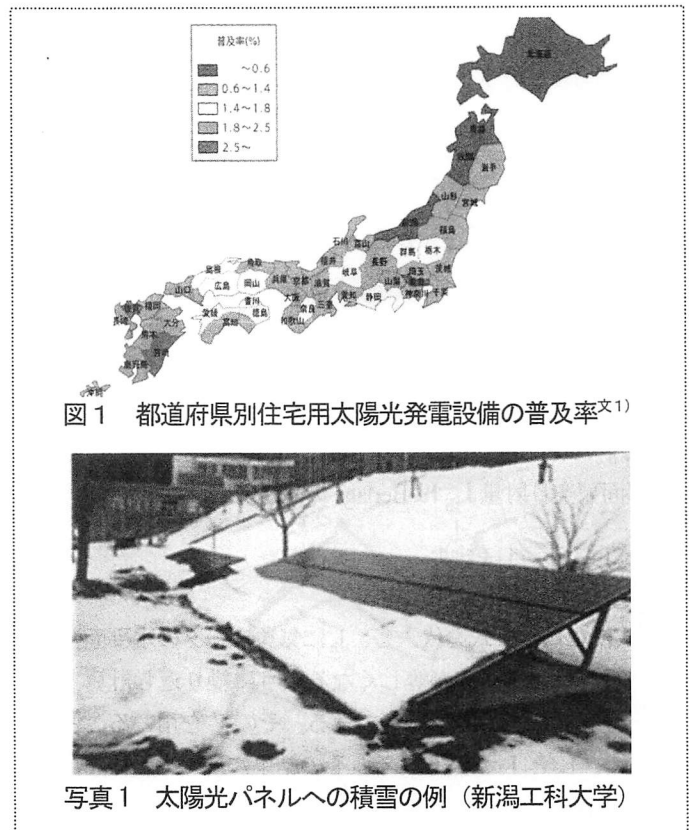
**Keywords** Photovoltaic, Snowy Region, Simulation, Inclined angle, Energy production

太陽光発電, 積雪地域, シミュレーション, 傾斜角, 発電量

### 1. 研究目的

地球温暖化対策として、再生可能エネルギーの導入は喫緊の課題であり、その普及のために様々な施策が進められている。中でも太陽光発電システムは急速に普及しており、一般住宅のみならず学校や病院等の公共施設にも大規模な太陽光発電システムが導入されつつある。また今回の大震災以降、これまでの大規模系統電力のみに依存する電力システムの見直しの機運が高まっている。しかしながら、図1に示すように、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。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、降雪後の快晴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（写真1参照）。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。

太陽光パネル上の積雪の問題を検討した事例としては、



\*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

細川・苫米地<sup>文2)</sup>が、屋外に角度の異なる太陽光発電モジュールを設置し、年間の発電量と日射量の観測を行うとともに、冬期間にはモジュールの積雪状況も観察した結果について報告している。それによれば、設置角度を90°に近づけることで、太陽光発電量の季節変動を小さくできる可能性を示している。また経済産業省の実証モデル事業により、克雪型太陽光発電システムの実証試験が行われており<sup>文3)</sup>、着雪による発電量への影響や設置角度の年間発電量との関係が調べられている。これらの成果は、積雪地域の太陽光発電の有効性を検討する上で貴重なものであるが、限られた地域の実物試験の結果であり、より多様な気象条件や設置条件に対応する検討を行うためには、気象データに基づくシミュレーション手法を構築することが必要である。

本論文では、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の第一段階として、傾斜角による着雪・落雪性状の変化をモデル化して組み込んだ発電シミュレーションにより、太陽光パネル傾斜角度が年間及び冬の発電量に与える影響を定量的に検討することを目的とする。

## 2. 研究方法

### 2-1 気象データに基づく発電量の算出

#### (1) 斜面全天日射量の算出

傾斜角を有する太陽光パネルの発電量の算出には、気象データとして整備されている水平面全天日射量  $J_h$  から斜面全天日射量  $J_\theta$  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  $J_{sh}$  に分離できる。

$$J_h = J_{dh} + J_{sh} \quad (1)$$

$$J_{dh} = J_{dn} \sinh \quad (2)$$

$h$  : 太陽高度

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

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

$J_0$  : 太陽定数 1,353 [W/m<sup>2</sup>]

水平面天空日射量  $J_{sh}$  は Berlage の式より、

$$J_{sh} = \frac{1}{2} J_0 \sinh \frac{1 - P^{\frac{1}{\sinh}}}{1 - 1.4 \ln P} \quad (4)$$

(1)式に(2)~(4)式を代入し、 $J_h$ に気象データ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气透過率  $P$  を求めることができる。その  $P$  を用いることによって、 $J_{dh}$  と  $J_{sh}$  が得られる。その結果に基づき、斜面全天日射量  $J_\theta$  を以下のように計算した。

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

$J_{d\theta}$  : 斜面直達日射量

$J_{s\theta}$  : 斜面天空日射量

なお今回は、地表面からの反射成分は考慮していない。周辺が雪面の場合は、その影響も無視できないと考えられるが、今後の課題としたい。傾斜面直達日射量  $J_{d\theta}$  は以下のように求める。

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

ここに  $i$  は傾斜面に対する日射の入射角で、次式で計算できる。

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

$A$  : 太陽方位角

$A_\theta$  : 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であるから、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。

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

#### (2) 推定発電量の算出

推定発電量  $X$  [kW] は次式で求めるものとする。

$$X = J_\theta \cdot \rho \cdot K_1 \cdot K_2 / 1000 \quad (9)$$

$\rho$  : 定格発電効率 (本研究では 5.25kW)

$K_1$  : 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<sup>注1)</sup>

#### 2-2 パネル状の積雪のモデル化

最寄りの地点の気象データにより得られる1時間毎の降雪深を累積し、それをパネル上積雪深と見なす。パネル上に積雪している期間は発電量を0とする。ただし融雪を考慮し、地上積雪深の減少に伴いパネル上積雪深も減少させた。パネル上積雪深が、あらかじめ決定した限界積雪深に達するとパネル上積雪は全て落雪するものとして、パネル上積雪深を0cmにリセットする。パネル上限界積雪深は、北海道江別市で行われた、1~3月の降雪量と発電低下率の関係を日別で集計した実測結果<sup>文3)</sup>を参考に、表1のように仮定した。時間降雪深とパネル上積雪深の関係を一例を図2に示す。

表1 パネル上限界積雪深

傾斜角	33度	45度	60度	90度
限界積雪深	15 cm	10 cm	5 cm	0 cm

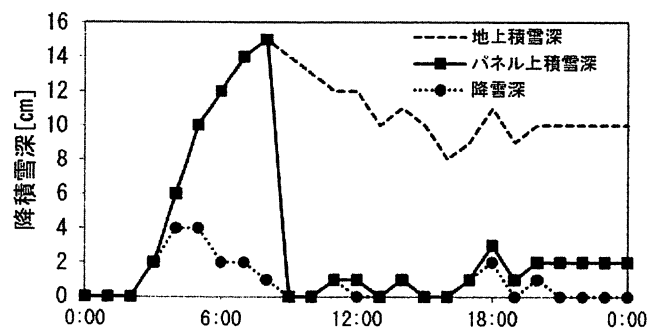


図2 降雪深とパネル上積雪深の関係の例

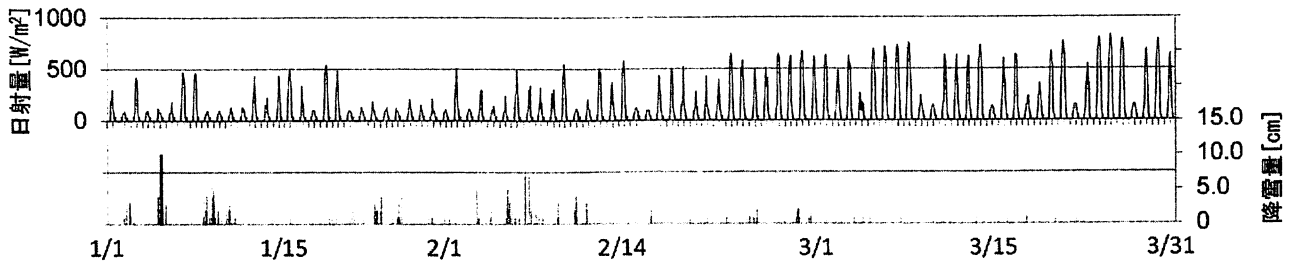


図3 1986年1~3月の日射量及び降雪量

### 2-3 シミュレーション条件

表2に解析条件及び解析ケースを示す。検討対象とする地域は新潟県・柏崎とする。将来の実測データとの比較・検証を想定して、太陽光パネルの仕様は、新潟工科大学に設置されている太陽光パネルに合わせた。日本建築学会・拡張アメダス気象データ<sup>5)</sup>が整備されている1980~2000年の間で、年間降雪量が最も多かった1986年を対象期間とした。なお本稿には示さないが、1984年のデータで同じシミュレーションを行い、ほぼ同様の傾向の結果が得られることを確認している。1時間毎の拡張アメダス気象データに基づき、2-1で説明した方法により1時間毎の発電量を求めた。当該年の冬期(1月~3月)の水平面全天日射量及び降雪量の変化を図3に示す。

解析ケースは、パネルの傾斜角を固定した場合を4ケース(33°, 45°, 60°, 90°)と夏期と冬期で変化させる場合を1ケースの計5ケースとした。

## 3. シミュレーション結果及び考察

### 3-1 積雪による発電量減少効果の確認

1986年の柏崎を対象とした発電シミュレーション結果から日別の発電低下率を求め、文献3の実測結果と同様に日別の降雪量で整理した結果を図4に示す。今回のパネル上積雪の挙動のモデル化によって、実測の積雪による発電低下の傾向を概ね再現していると判断できる。

### 3-2 傾斜角度による発電量の変化

降雪量の多い代表的な1週間における積雪を考慮した場合の発電量のシミュレーション結果を示す。傾斜角が33度では全く発電しない日があるのに対して、90度の場合は、毎日発電が得られていることが確認できる。図6に月別の発電量を傾斜角度別に比較した結果を示す。春から秋にかけては、33度の場合が最も発電量が大きく、角度が急になるにつれて発電量が減少している。冬期は日射量自体が小さく、傾斜角による発電量の差は小さいが、1,2月では、90度が最も発電量が多い。

図7は、冬期(1~3月)の発電量を傾斜角度別に比較したものである。積雪の影響を考慮しない場合の発電量を併せて示す。積雪を考慮した場合、45度が最も発電量が大きくなり、積雪の影響を考慮した最適な角度の存在が示唆される。一方、年間の発電量を比較すると(図8)、全体に対

表2 解析ケース

対象地域	新潟県柏崎市(緯度:138.58° 経度:37.34°)
パネル容量	5.25kW
パネル方位	真南
パネル傾斜角	①33度 ②45度 ③60度 ④90度 ⑤可変(夏期:33度、冬期:60度)

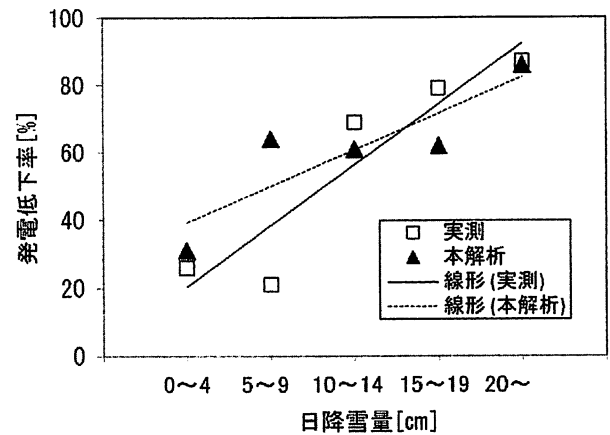


図4 日降雪深別の発電低下率の実測との比較

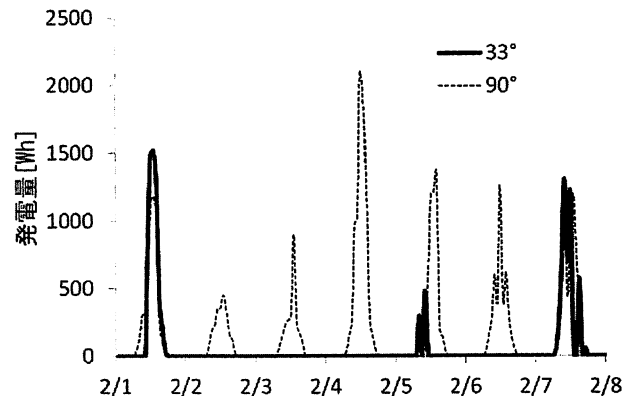


図5 代表週の発電量の変化

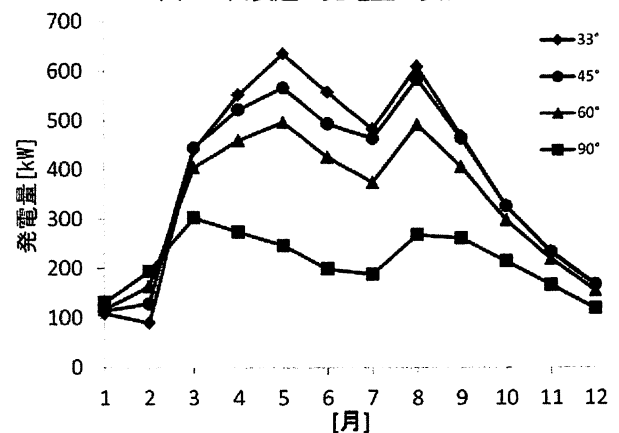


図6 傾斜角度による月別発電量の比較

する冬期の発電量の寄与は小さく、傾斜角が急勾配になるにつれて発電量が減少している。

### 3-3 季節による傾斜角度可変方式の有効性の検討

図9に傾斜角度を固定した場合と冬期と夏期で変化させた場合の発電量の比較を示す。傾斜角度を可変とすることで、わずかではあるが、年間の発電量が増加することが確認できる。パネルの可動方法を簡易化・効率化することでより大きな発電量の増加も見込めるものと考えられる。

## 4. 結論

- 1) 太陽光パネル上の積雪の影響を考慮した発電量のシミュレーション手法を提案し、新潟県・柏崎を事例として、年間の発電シミュレーションを実施した。
- 2) その結果、太陽光パネルの傾斜角を急にすることによって、落雪が促進され、冬期の発電量の増加が見込まれることが明らかになった。しかし、冬期の日射量自体が少ない場合、年間の発電量に与える影響は小さいため、電力需要状況あるいは売電計画と併せて考慮する必要がある。
- 3) 今後は、パネル上の積雪のモデル化の精度を実測との比較によって検証するとともに、多様な気象条件における傾斜角度と発電量の関係を調べていく予定である。

**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の助成により行われた。記して関係各位に謝意を表する。

## 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，苫米地司：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) ほくでんエコエナジー株式会社：低炭素社会に向けた技術発掘・社会システム実証モデル事業（積雪の影響を受けない太陽光発電システムの開発・実証）報告書，2010. 3
- (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
- (5) 日本建築学会編：拡張アメダス気象データ 1981-2000

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。

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

$J_\theta$  : 斜面全天日射量 $[W/m^2]$

$J_{e\theta}$  : 斜面実効放射量 $[W/m^2]$

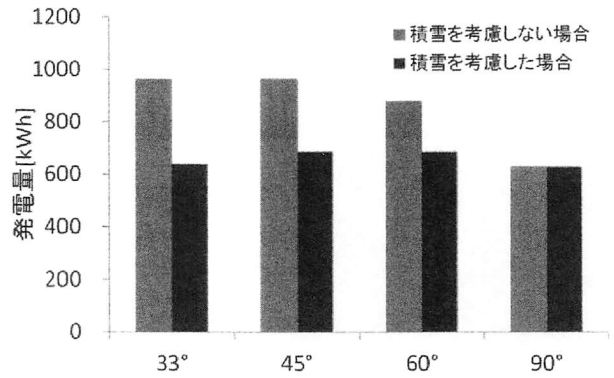


図7 傾斜角度による冬期（1～3月）の発電量比較

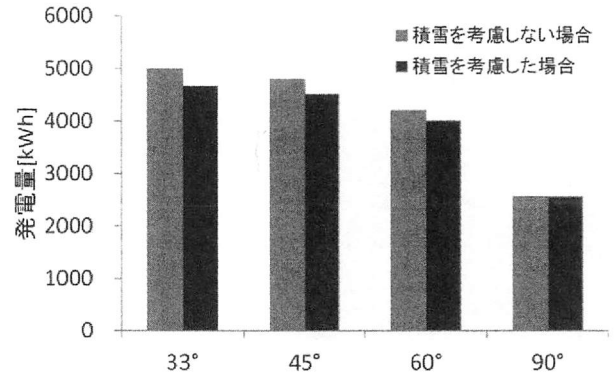


図8 傾斜角度による年間の発電量比較

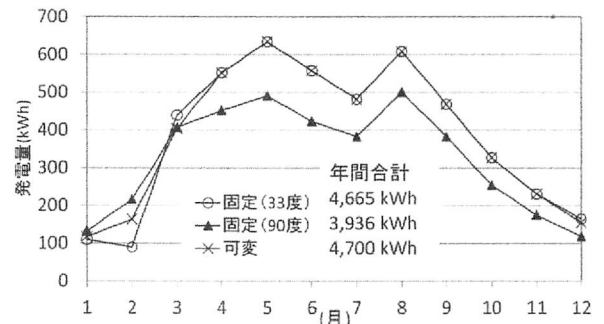


図9 角度固定と角度可変の場合の発電量の比較

$t_a$  : 気温 $[^{\circ}C]$

$\alpha_c$  : 対流熱伝達率(11.6)  $[W/m^2C]$

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  $[K]$

$\sigma$  : Stephan-Boltzman 定数 $(=4.88 \times 10^{-8}) [kcal/m^2hk^4]$

$e$ 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。

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

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。

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