

# 降雪後の PV 出力低下量の推定

## Estimation of PV output reduction after snowfall

宇佐美 章<sup>1</sup>, 橋本 篤<sup>2</sup>

### 1. 太陽光発電に係る電力系統運用と積雪

#### 1.1 太陽光発電と積雪

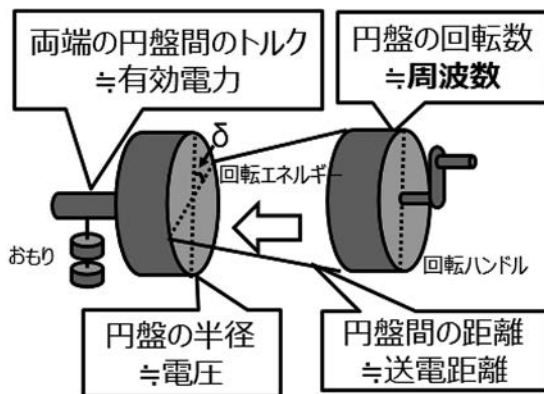
太陽光発電 (PV) は、世界的に設置が拡大しており、その中には積雪地域も含まれる。しかし、PV パネル上に雪が積もると日射が遮蔽されるため、発電できなくなる。PV 発電量に対する積雪の影響は、IEA (International Energy Agency: 国際エネルギー機関) で、“汚れによる損失 (Soiling Loss)” の一つとして調査され、高緯度、低温の豪雪地域を中心に検討されている<sup>1)</sup>。これらを含めて検討の多くは、積雪下で如何に高い年間発電量を得ることが出来るかが主な論点である。単純に積雪による損失を見積もるだけではなく、例えば、両面受光のパネルを用いて裏面からの雪の反射で冬季の発電量の低下を防止するなどの研究もある<sup>2)</sup>。また、豪雪地域では建物上部からの落雪による人的被害の防止の観点から建材への着雪・落雪も検討されており<sup>3)</sup>、建物の屋根に設置される PV パネルも、発電量に加え

て、同様の観点からも落雪について検討されている<sup>4)</sup>。

#### 1.2 電力系統運用と積雪

経済的損失や人的被害以外にも、PV パネル上への積雪は、電力会社の系統運用でも問題になる。電気と聞くと一般には乾電池と豆電球のような電気回路を思い浮かべるかもしれない。しかし、電力会社の回路 (電力系統) は、発電機により回転の機械的なエネルギーを電氣的なエネルギーに変換して、送電線で送電し、例えば、モーターのような機械で仕事をするシステムのイメージの方が適当である。この説明には、図 1 に示す力学に例えたモデルが比較的よく用いられる<sup>5)</sup>。乾電池と豆電球の回路では電圧によって電流が流れて豆電球がつくが、電力系統では、図 1 のモデルで“ねじれ”で示される  $\delta$  が、電力を運ぶ力に相当する。ここで、もし、おもりが軽く、ハンドルとする仕事が大きいと、ハンドルの回転数は増加する。このハンドルの回転数は電力系統では“周波数”に対応する。周波数は北海道・東エリアでは 50Hz、沖縄・中西エリアでは 60Hz に保たなければならない。このために、需要に合わせた電力を供給する必要がある。PV が電力系統に接続されていると、他の発電機などから供給する電力は、需要からこの分を差し引いた量に調整しなければならない。そのため、電力会社は、各時刻で正確な PV の出力を把握する必要がある。

電力会社では、日射量などからの推定計算値を PV 出力として用いている<sup>6,7)</sup>。そのため、パネル上への積雪により発電出力が低下すると正確な PV 出力の把握が困難になる。この場合、冬季を通じた豪雪地域だけではなく、頻度は多くなくても積雪があ



需要と供給のバランスは周波数に影響  
 供給 > 需要 : 周波数は増加  
 需要 > 供給 : 周波数は減少

図 1 力学モデルによる電力系統のイメージ

<sup>1)</sup> 一般財団法人電力中央研究所 エネルギー変換システム研究本部 兼 グリッドイノベーション研究本部

<sup>2)</sup> 一般財団法人電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部

る地域では、積雪の都度、影響が出る。特に、積雪が多くない地域ほど、一旦積雪があると影響が大きく、それに対する対策が問題になっている。パネル上への積雪による発電出力の低下の推定は、現在でも確立した手法がない難しい課題である。本稿では、これに向け、パネル上の雪の挙動や発電への影響を理解する取り組みを紹介する<sup>8)</sup>。

## 2. パネル上の積雪

### 2.1 パネル上の積雪の挙動

ここでは、富山県氷見市が建物屋上に設置したPVパネルを撮影した画像をもとに、パネル上への積雪とその落雪、融雪の事例を紹介する。

富山県は、冬季の大陸からの季節風が日本海の暖流（対馬海流）から水蒸気を供給され、それが飛騨山脈で上昇するため降雪量が多い。しかし、気象庁の観測では、氷見市の1月～12月の平均気温は3.4℃

で、日最高気温が0℃より低い3か月間の平均日数は0.5日しかない。したがって、北欧やカナダなどの世界的な豪雪地帯とは異なり、雪がパネル表面に固着する状況になることは少ない。

パネル上への積雪後に、パネルから雪がなくなる典型例は、まず、パネルから落雪し、その後パネル上で融雪する事例である。このようにパネルから雪がなくなる事例の時系列を図2に示す。1枚目の画像でパネル上にある雪は、2枚目の画像にあるようにパネルから落雪し、その後に残った3枚目、4枚目の画像の雪はパネル上で融けている。

しかし、実際のパネル上の雪の挙動は複雑である。図3は、パネルの縁に雪が溜まる様子を示している。また、右図ではパネルの縁から雪が垂れ下がっている。「粉雪」という言葉があるが、雪は常にさらさらしているわけではなく、雪の結晶間が融合して、積雪内部には全体として形を保つような力が働く。

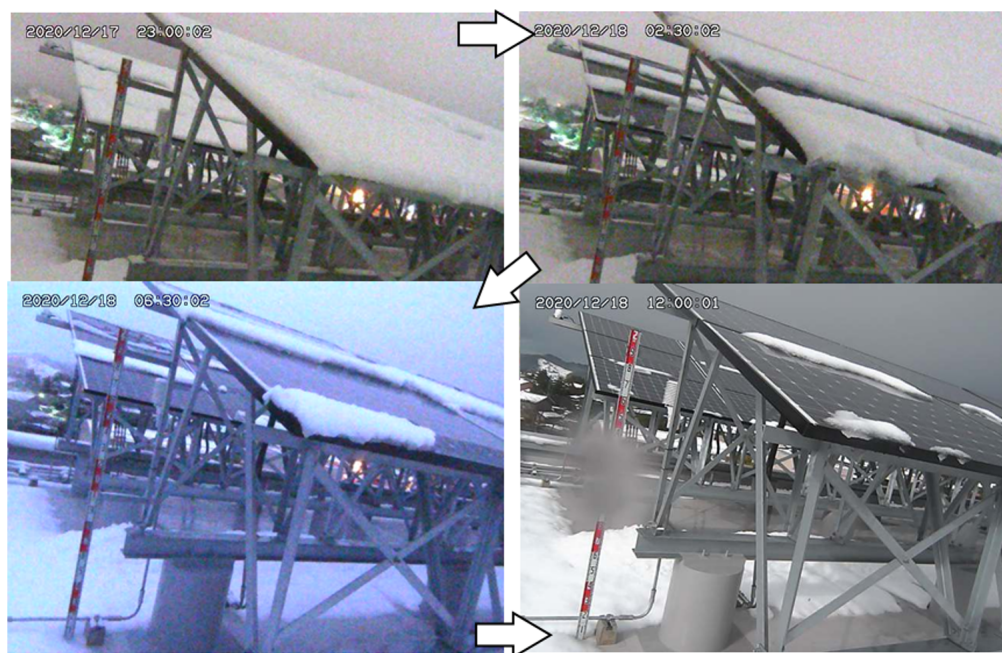


図2 パネルからの落雪とパネル上での融雪により雪がなくなる事例



図3 パネルの縁の効果

その結果、パネルの縁のフレームに引っかかった雪が内部の結合力で塊となって垂れ下がっている。

## 2.2 パネル上の雪の挙動のメカニズム

PV パネルからの落雪メカニズムは検討例もあるが<sup>9)</sup>、パネル上の雪の挙動は氷雪の摩擦のメカニズムに影響される。このメカニズムは長年研究されてきたが、説明が難しい課題である<sup>10)</sup>。ここでは正確な計算ではないが、パネル上の雪の挙動のおおよその特徴を簡単なモデルをもとに考察する。

滑雪力  $S$  と静止摩擦抵抗力  $F_{sf}$  を使って滑雪の条件を表現すると、雪の重さからくる滑雪力  $S$  が静止摩擦抵抗力  $F_{sf}$  より大きい、 $S > F_{sf}$  が滑雪の条件式になる。この条件で計算すると、計算上は数°の傾斜角さえあれば滑雪する。しかし、前記のように、PV パネルには適度な傾斜角があっても、少なからぬ量の積雪が見られる。

雪は全体が一塊で落雪する場合もあるが、一部のみ落雪する場合も多い。この場合、雪自身が形を保つ力として、上部の雪による引張力  $F_t$  や側面の雪によるせん断力  $F_s$  も考慮する必要がある。これらを考慮すると、一部が落雪する場合の滑雪開始条件は、 $S > F_{sf} + F_t + 2F_s$  になり、計算上は 20° 程度以上の傾斜角が必要である。PV パネルは単純なガラス板ではなく、縁にはアルミなどのフレームのわずかな突起がある。パネルからの落雪では、雪自身の重さとガラスとの摩擦の関係に加えて、雪内部の引張力や摩擦力で雪自身が形を保つ力のために、パネルの縁などのわずかな突起で静止する力も無視できず、パネルの縁に雪溜まりができると考えられる。

パネル上の融雪は、熱収支から雪への貯熱量を基

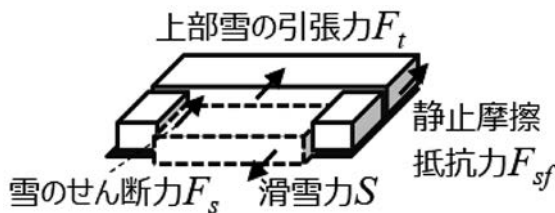


図4 PV パネル上の雪にかかる力

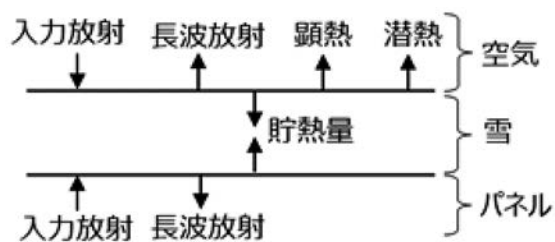


図5 PV パネル上の雪への熱収支

に計算することができる。雪への熱入力と雪からの熱出力を、文献<sup>11)</sup>を参考に、図5にまとめた。これから熱収支は以下の式になる：

$$\begin{aligned} \text{貯熱量} &= \text{雪への熱入力} - \text{雪からの熱出力} \\ &= \text{入力放射} - \text{長波放射} - \text{顕熱} - \text{潜熱} \end{aligned}$$

ここで、顕熱は、空気を温めるエネルギーで、潜熱は水を蒸発させるエネルギーである。この貯熱量が融雪のエネルギーとして使われる。なお、地面への積雪では、裏面側は 0℃ と仮定でき、裏面の入力放射と長波放射は釣り合っている。しかし、パネル上への積雪では、発電が始まるとパネル自身が発熱する。このため、パネル側の熱収支は釣り合わなくなり、裏面（パネル側）入力放射と長波放射を個別に考慮する必要がある。

融雪の要因としてまず考えられるのは気温の上昇である。図6は気温と融雪量の関係の試算例である。日射も風もない場合（具体的には無風の夜間）は、日射量が 0W/m<sup>2</sup> のケースである。ここで融雪量が負の値の場合は、熱収支からは融雪しないことを表している。すなわち、図6からは、気温が 5℃ 程度以上ないと融雪は起こらない。

夜間ではなく日中では日射量は 0 ではなくなる。特に、太平洋側の低気圧による積雪では、降雪後に晴れることも珍しくない。太陽高度が高い快晴時に相当する日射量 1000W/m<sup>2</sup> の結果も図6に示した。夜間では気温が 15℃ あっても融雪量は 1cm/h より小さいのに対して、快晴の場合は、仮に気温は氷点下でも、融雪量は 1cm/h を超える。この結果では、相対的に気温より日射のほうが融雪への影響は大きい。

図7は、気温と融雪量の関係への風の影響を示す。気温が 15℃ で風速 6m/s のケースの融雪量は 2.7cm/h であった。図6の日射量 1000W/m<sup>2</sup> の気温 15℃

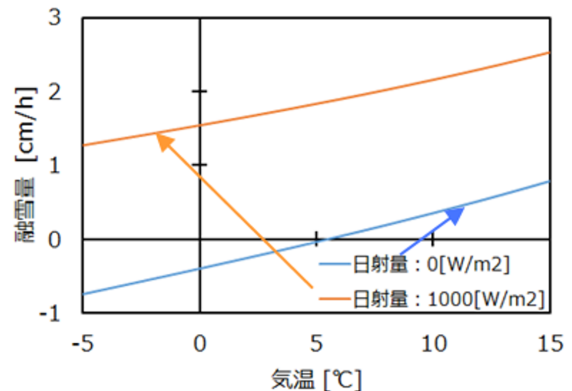


図6 気温と融雪量の関係への日射の影響試算例  
パネル温度は 0℃、風速は 0m/s とした

の時の融雪量に相当する風速がこの程度ということになる。

全体として、融雪には日射量の影響が大きい。また、条件によっては風速も同程度の影響を与える。言うまでもなく、気温の上昇も融雪を促進する要素である。さらに、パネルの発電による温度上昇も融雪に一定の効果がある。

### 3. 積雪後のパネル温度・発電量の変化

当所では、群馬県前橋市の赤城試験センターに評価用 PV システムを設置している。群馬県は新潟県と越後山脈を隔てて接しているが、前橋市は、群馬県北部から図 8 に示した赤城山を超えた南側に位置している。そのため、日本海側からの季節風による降雪はほとんどない。前橋では、関東平野に降雪が

ある場合に降雪することが多い。

赤城試験センターの評価用 PV パネルは、真南に向き、傾斜角 30° の架台上に設置されている。需要家 1 軒に設置される平均的なシステムに相当するパネル容量 (3 ~ 4kW) を 1 台のパワーコンディショナーで、構内の配電線に連系している。ここで示した PV システムの太陽電池の種類は結晶系シリコン太陽電池である。

図 9 に積雪の 1 事例での日射量、発電出力、パネル裏面温度の時系列の変化を示す。また、この時のパネルの画像を図 10 に示す。この事例では、8:00 の時点でアレイの上段の上半分程度は滑雪により雪がなかった。この時は、前日の朝以降には降雪はなく、昼頃からアレイ上の積雪は全体として少しずつ落雪していた。パネル温度を見ると、8:00 の時点

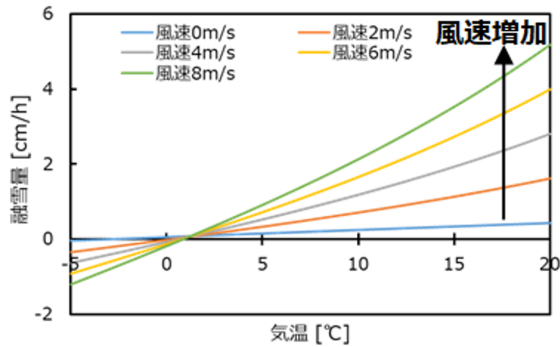


図 7 気温と融雪量の関係への風速の影響試算例  
日射量の少ない曇り (日射量 = 200W/m<sup>2</sup>) を想定した。



図 8 PV 設置場所 (赤城試験センター) の地理

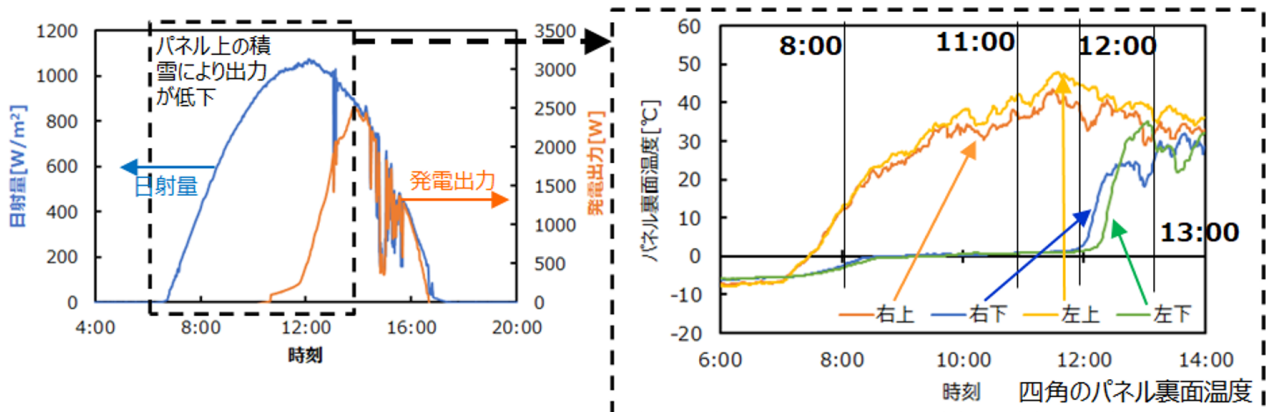


図 9 積雪の 1 事例での日射量、発電出力、パネル裏面温度の時系列の変化



図 10 図 9 の事例でのアレイの画像

では、上の左右のパネル温度も雪の温度より高い 10℃ 程度あり、外観と一致していた。画像からは、11:00 頃までは少しずつ落雪もしているように見えたが、それ以降は落雪よりむしろパネル上で融雪している。最終的には、13:00 頃には画像とパネル温度の両方から、アレイ上の雪はほとんどなくなっている。

一方、発電については、図 9 に示すように、当日は朝から晴れていたにも関わらず 12:00 くらいまではほとんどない。発電量が急速に回復したのは 12:00 ~ 13:00 の間で、13:00 以降は日射量の変化と発電出力の変化が良く一致しているの、積雪の影響はなくなったと言える。

この事例を見ると、発電量はアレイ上の雪が覆われていない面積に比例して回復するのではないことが分かる。そのため、PV の出力が急速に回復することだけを見て、パネル上の雪が急速になくなっていると推測するのは適当でない。実際は、アレイからの落雪にせよアレイ上の融雪にせよ、アレイ上から比較的多くの雪がなくなってから急速に発電は回復する。これは、アレイのパネルやパネル内のセルは直列で接続されている量が多いことが原因である。また、アレイからの落雪とアレイ上の融雪を比較すると、融雪は雪の厚さは変化するが雪の面積はあまり変わらないのに対して、落雪では雪の面積が減少する。しかし、アレイ上の雪がかなりなくなると発電を始めないので、両方のプロセスが PV の出力の回復には影響する。

#### 4. 気象データを踏まえたまとめ

パネル上に積雪するかどうかは、PV 設置地点に降雪があり、それが積もることが必要条件になる。

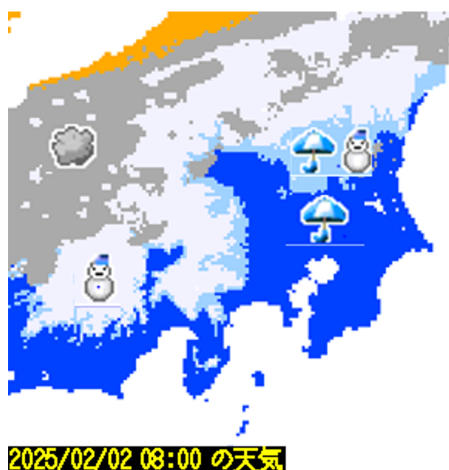
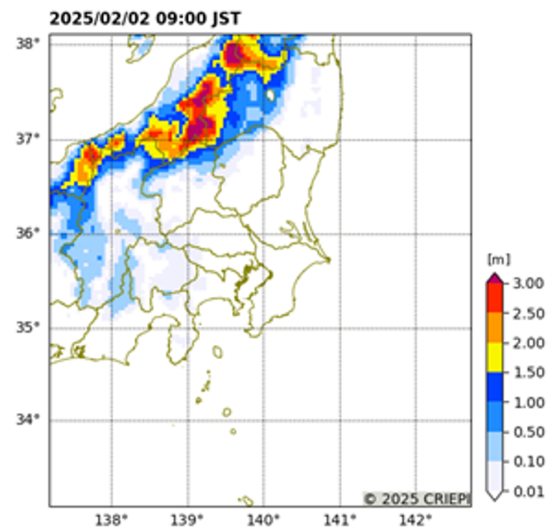
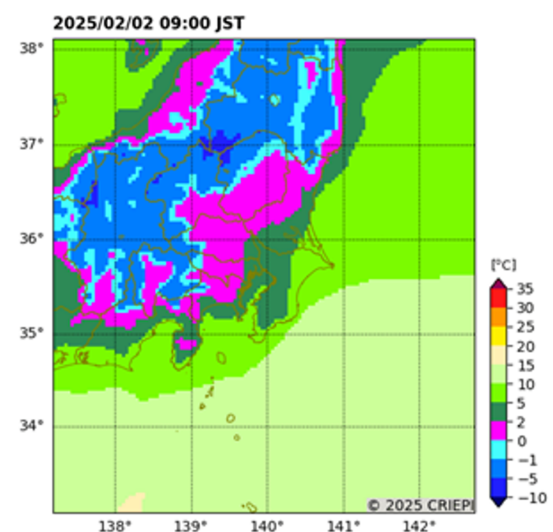


図 11 雪と雨の分布の事例  
気象庁「推計気象分布：関東地方」を加工して作成

そのため、降雪・積雪の有無は PV 出力への影響に対して最も重要である。特に、関東地方などに降雪する場合には、雪か雨かは近隣の地域でも大きく異なる場合が少なくない (図 11)。さらに、本稿で記述したように、融雪量には、日射量、風速、気温などの気象条件が大きく関係する。また、融雪により雪とパネルの界面に水膜ができることで落雪しやすくなるとされており、落雪にもこれらの気象状況は関係する。気象庁も積雪深などのマップデータをホームページなどで公開しているが、融雪や落雪に関係する気象条件を組合せた細かいメッシュでの気象情報が有用である。電力会社の PV 出力予測には、図 12 に例示するような数値気象モデルによる地点毎のメッシュ予報が用いられる。このような気象



(a) 積雪深



(b) 気温

図 12 数値気象モデルによるメッシュ予報例  
電力中央研究所の気象予測・解析システム NuWFAS

データの降雪時の出力低下量の推定への活用を進めてゆくことが重要である。

## 謝辞

富山県氷見市提供の画像は、経済産業省「2021年度エネルギー構造高度化・転換理解促進事業費補助金」によるものです。提供に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Soiling Losses – Impact on the Performance of on Photovoltaic Power Plants Plants 2022, Report IEA-PVPS T13-21 : 2022.
- 2) Koami Soulemane Hayibo, Aliaksei Petsiuk, Pierce Mayville, Laura Brown, Joshua M. Pearce, Monofacial vs bifacial solar photovoltaic systems in snowy environments, Renewable Energy 193 (2022) p.657-668.
- 3) 佐藤 雄輝, 千葉 隆弘, 苫米地 司, 大塚 清敏, 田畑 侑一, 建築物における構造部材の着雪・落雪に関する研究, 北海道科学大学研究紀要, 第 40 号 (平成 28 年).
- 4) 東山 禎夫, 堺 勇人, 渡辺 憲, 太陽電池アレイ上の雪滑落に及ぼす降雪開始時の表面温度の影響, 雪氷研究大会 (2013・北見) 2013.9.17-9.21.
- 5) 電力系統の利用を支える解析・運用技術, 電気学会技術報告, 第 1100 号, (平成 19 年 9 月) p.24-26.
- 6) 宮下和稔. 太陽光発電予測システムの開発と実用化. 中部電力 技術開発ニュース 2015 年, 153 号, p19-20.
- 7) 橋本篤. ひまわり 8 号・9 号の衛星画像に基づく日射量予測・解析システムの開発. 太陽エネルギー 2025 年, Vol.51 No.1 p12-17.

- 8) 宇佐美章, 橋本篤. 電力中央研究所報告 (執筆中).
- 9) Abdel Hakim Abou Yassine, Navid Namdari, Behrouz Mohammadian, Hossein Sojoudi, Understanding mechanisms of snow removal from photovoltaic modules, Solar Energy 231 (2022) p.175-184.
- 10) 対馬勝年, 氷雪のトライボロジー, 富山大学理工学研究部 (理学) (2013).
- 11) 近藤純正, 水環境の気象学 – 地表面の水収支・熱収支 –, 朝倉書店 (1994).

## 著者略歴



宇佐美 章 (ウサミ アキラ)

2001 年 7 月早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。1994 年 4 月 (財) 電力中央研究所に入所。現在, (一財) 電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部材料科学研究部門兼グリッドイノベーション研究本部 ENIC 研究部門に所属。主として, 太陽光発電の屋外評価及び電力系統の運用への応用に関する研究に従事。博士 (工学)。第 1 種電気主任技術者。



橋本 篤 (ハシモト アツシ)

2005 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻博士後期課程修了。2006 年 4 月 (財) 電力中央研究所に入所。現在, (一財) 電力中央研究所サステナブルシステム研究本部気象・流体科学研究部門に所属。主として, 自然エネルギー発電の予測や電力設備のハザード予測・評価などに関する研究に従事。博士 (工学)。