

水上設置型 PVS の絶縁抵抗観測

Insulation Resistance Observation of Floating PV System

池田一昭*, 高島 工*, 大関 崇*

1. はじめに

太陽光発電設備における対地絶縁抵抗（以下、絶縁抵抗と称する）は、感電や火災等の事故防止の観点から観測すべき最重要項目のひとつであるが、設備の発電部である直流回路側の絶縁抵抗は、設備を構成する部材（主に太陽電池モジュールや配線ケーブル）の数や量はもとより、設備を取り巻く気温や湿度等の環境条件によっても大きく変動することから、絶縁状況が良好か否かについて、測定された抵抗の値のみから判断することが難しく、絶縁抵抗測定時には天候の記録や気温、湿度の測定も必須である¹⁾。本報では、ため池に設置された太陽光発電設備の絶縁抵抗と設備を取り巻く環境条件を約2年間観測したデータについて絶縁抵抗値と環境条件の相関を分析し、絶縁抵抗値が上昇あるいは低下する条件や低下した抵抗値を観測するタイミングについて考察した結果を報告する。

2. 観測

女井間池水上太陽光発電所（香川県木田郡三木町池戸）において、2022年2月より設備の絶縁抵抗観測を行っている。設備全体の規模は、太陽電池アレイ容量 2822.4kW、太陽電池モジュール枚数 9,408 枚であるが、パワーコンディショナにより南北の2つのアイランドに2等分割されており、本観測は南側のアイランドを対象として実施した。絶縁抵抗観測装置（BENDER 社製 isoPV1685P-425）を設備内の1本の太陽電池モジュールストリングに挿入して、南側アイランドのアレイ全体の絶縁抵抗値の計測を行った。絶縁抵抗観測装置を設置した近傍の1枚の太陽電池モジュールの裏面（バックシート面から約 2cm 隔離）に温度湿度プローブ（VAISALA 社製 HMP155）を設置して、モジュール裏面近傍の

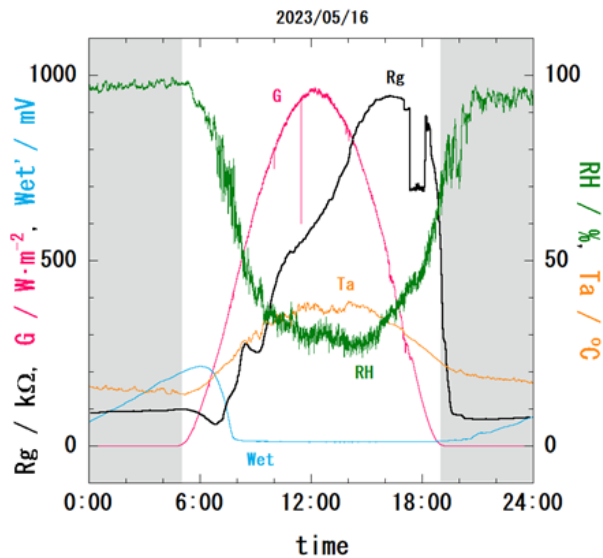
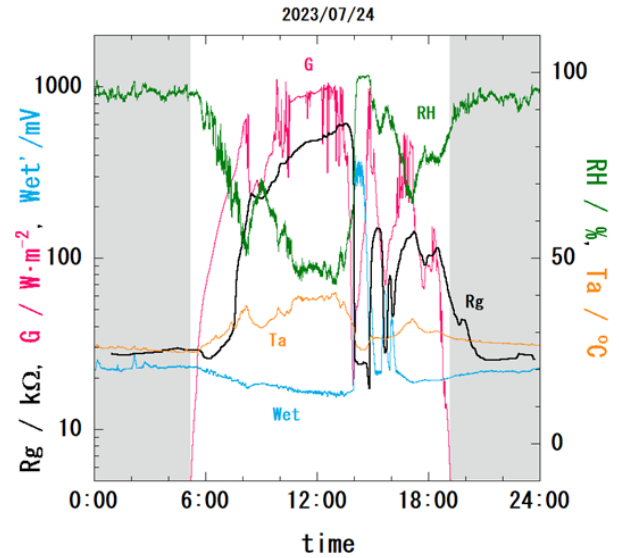
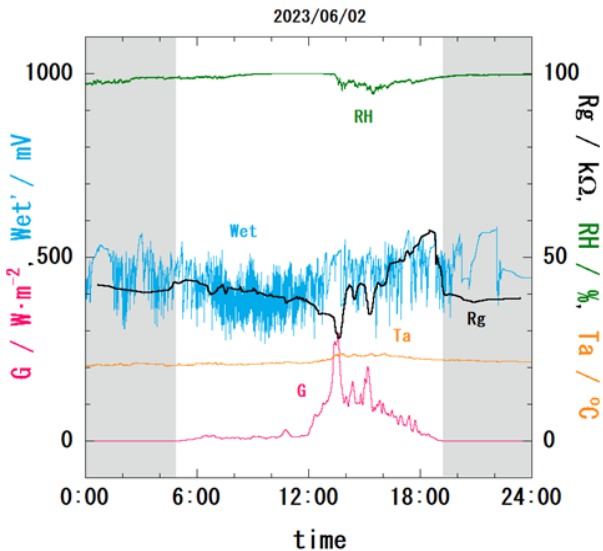
気温と湿度の計測を行った。また、温度湿度プローブを設置した太陽電池モジュールの表裏それぞれの面に日射計（英弘精機製 ML-02）および熱電対を1組ずつ設置することで、モジュール表裏の日射強度および表面温度の計測を行った。さらに、このモジュールのガラス面に沿うように葉濡れセンサー（METER 社製 PHYTOS-31）を設置し、このセンサーをモジュールのガラス表面と見立てて水分の有無についての計測も行った（2023年5月より）。観測は2024年5月末現在も継続中である。

3. 観測結果

3.1 絶縁抵抗と環境条件の相関

2023年5月16日の観測結果について、絶縁抵抗値 R_g [k Ω]、モジュール表面日射強度 G [W/m²]、モジュール裏面近傍の気温 T_a [°C]、モジュール裏面近傍の相対湿度 RH [%]、および葉濡れセンサー出力 Wet [mV] の経時変化を Fig1(a) に示した。絶縁抵抗値は不定期計測（変動幅が 1k Ω 以上のとき計測）の瞬時値、環境値はサンプリング 1Hz の瞬時値を示した。絶縁抵抗値は1日のうちで 58k Ω （6:47）から 945k Ω （16:15）まで幅広く変動していた。夜間（高松地方気象台付近での日没時刻前および日没時刻後²⁾）は気温が相対的に低く、相対湿度が概ね 90% 以上と高くなっており、この間の絶縁抵抗は概ね 100k Ω 未満の相対的に低い値を示した。逆に、日中は気温が上昇し、相対湿度も低下し、この間の絶縁抵抗は概ね 100k Ω よりも遙かに大きく、相対的に高い値を示した。また、夜間から早朝にかけて結露によると考えられる葉濡れセンサーの信号増加が観測され、夜明けに起因する気温上昇により結露が解消する過程と考えられる葉濡

* 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所

Fig.1(a) Rg, G, RH, Ta and Wet vs. time on 16th May, 2023.Fig.1(c) Rg, G, RH, Ta and Wet vs. time on 24th July, 2023.Fig.1(b) Rg, G, RH, Ta and Wet vs. time on 2nd June, 2023.

れセンサーの信号減少の際に、絶縁抵抗値の低下が観測された。季節により絶対値が異なったものの、好天日の1日における絶縁抵抗値の変化の傾向は、観察期間を通して概ねこの日と同様の傾向を示した。次に、2023年6月2日の観測結果を Fig.1(b) に示した。絶縁抵抗値は1日のうちで大きな変動はなく、その変動幅は28kΩ (13:38) から57kΩ (18:30) であった。相対湿度は終日90%以上で、気温の変動幅も20～24℃程度(平均21.7℃)とほぼ一定であったが、日射が回復した際に絶縁抵抗値の低下(28kΩ @ 13:38, 34kΩ @ 15:15, など)が観測された。季節により絶対値が異なったものの、雨天日の1日における絶縁抵抗値の変化の傾向は、観察期間を通して概ねこの日と同様の傾向を示した。

次に、2023年7月24日の観測結果を Fig.1(c) に示した。未明に28kΩ (2:42) だった絶縁抵抗値は早朝に26kΩ (6:08) まで低下し、その後は徐々に増大して600kΩ (13:14) に達した。午後に天候が急変し、14時頃の降雨によって442kΩ (13:56) から26kΩ (14:02)～23kΩ (14:42) 程度まで絶縁抵抗値が短時間で急激に低下した。この間、気温も6℃程度低下した。更に、この直後に日射が374W/m² (14:42) から971W/m² (14:46) まで急峻に回復した際に、絶縁抵抗値が23kΩ から17kΩ まで更に低下した。この間の気温は1℃程度の上昇であった。日中において、好天に近い状況からの急な降雨の開始時や雨天における急峻な日射の回復時などに、急峻かつ大幅な絶縁抵抗値の変動が観察期間を通じて数多く観察された。

3.2 昼夜および晴雨の別による絶縁抵抗値の変動

昼夜および晴雨の別による絶縁抵抗値を Fig.2(a) および Fig.2(b) に示した。絶縁抵抗値は10分間平均値を示した。また、昼夜については日出・日没の時刻により区別を行い、晴雨の区別については日本気象協会の雨雲レーダー図³⁾における女井間池付近の雨雲の有無により1時間単位で判別を行った。Fig.2(a) に示したとおり、雨雲がない場合の昼夜では、夜間の方が気温の低下に起因して抵抗値が小さい頻度が高く、早朝にかけて更に気温が低下することによる抵抗値の低下が多く観測された。日中は基本的に気温の上昇により抵抗値が大きい頻度が高かったが、Fig.1(a) で見られたように、好天の早朝(日出後)において夜間よりも抵抗値が低下する

ことが頻繁に観測された。この現象は春と秋に特に顕著に観測された。Fig2(b) に示したとおり、雨雲がある場合には、日中も夜間と同程度の抵抗値が観測される頻度が高かった。夜間で比較した場合、雨雲がある場合の方が抵抗値はやや低い傾向にあったが、日中における雨雲の有無による変動ほどの顕著な差は見られなかった。

3.3 絶縁抵抗と相対湿度との相関

2022年2月から2024年2月までの絶縁抵抗値の経時変化について、相対湿度との相関をFig3に示した。絶縁抵抗値は10分間平均値を示し、相対湿度も10分間平均値を用いた。観察期間を通して相対湿度が高い夜間や雨天時に絶縁抵抗値が低く、相対湿度が低い好天時や日中に値が高い傾向にあった。絶縁抵抗値と相対湿度は概ね負の相関を示していたが、相対湿度90%以上でも冬季には200kΩを

超える値が観測されることもあり、相対湿度が40%以下でも400kΩを下回る値が観測されることがあるなど、相対湿度以外の環境条件も踏まえた多角的な分析の必要性が示唆された。

3.4 絶縁抵抗と気温および容積絶対湿度との相関

相対湿度 RH [%] と気温 T_a [°C] を用いると、単位体積あたりの水分量を示す容積絶対湿度 VH (Volumetric Humidity) [g/m³] を次式により近似的に算出できる⁴⁾。

$$VH = \frac{RH}{100} \cdot \frac{216.67}{(T_a + 273.15)} \cdot 6.1078 \times 10^{\left(\frac{7.5 T_a}{T_a + 237.3}\right)} \quad (1)$$

絶縁抵抗値の経時変化について、気温および容積絶対湿度との相関をFig4に示した。絶縁抵抗値および容積絶対湿度は10分間平均値を示し、気温も

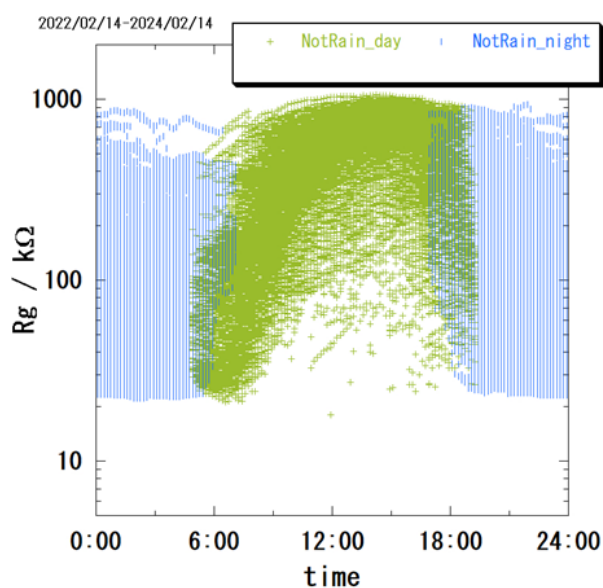


Fig.2(a) Rg without rain clouds vs. time.

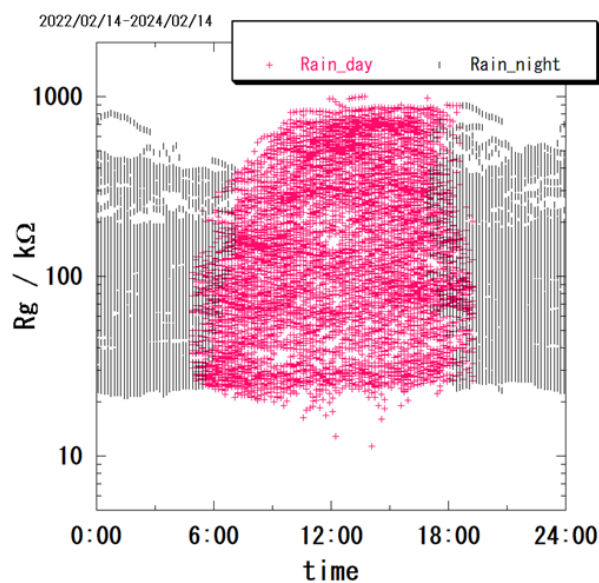


Fig.2(b) Rg under rain clouds vs. time.

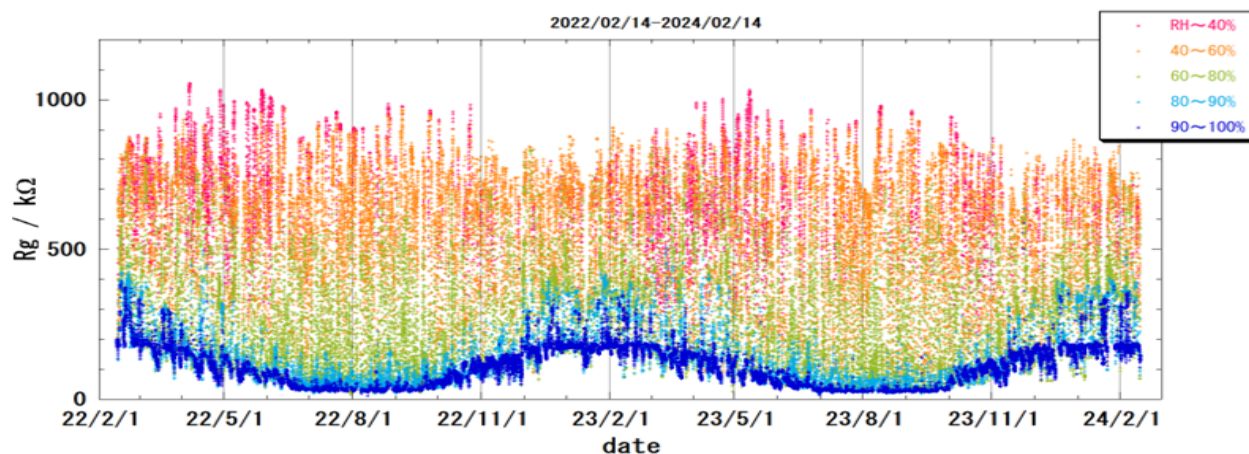


Fig.3 Rg associated with RH vs. date.

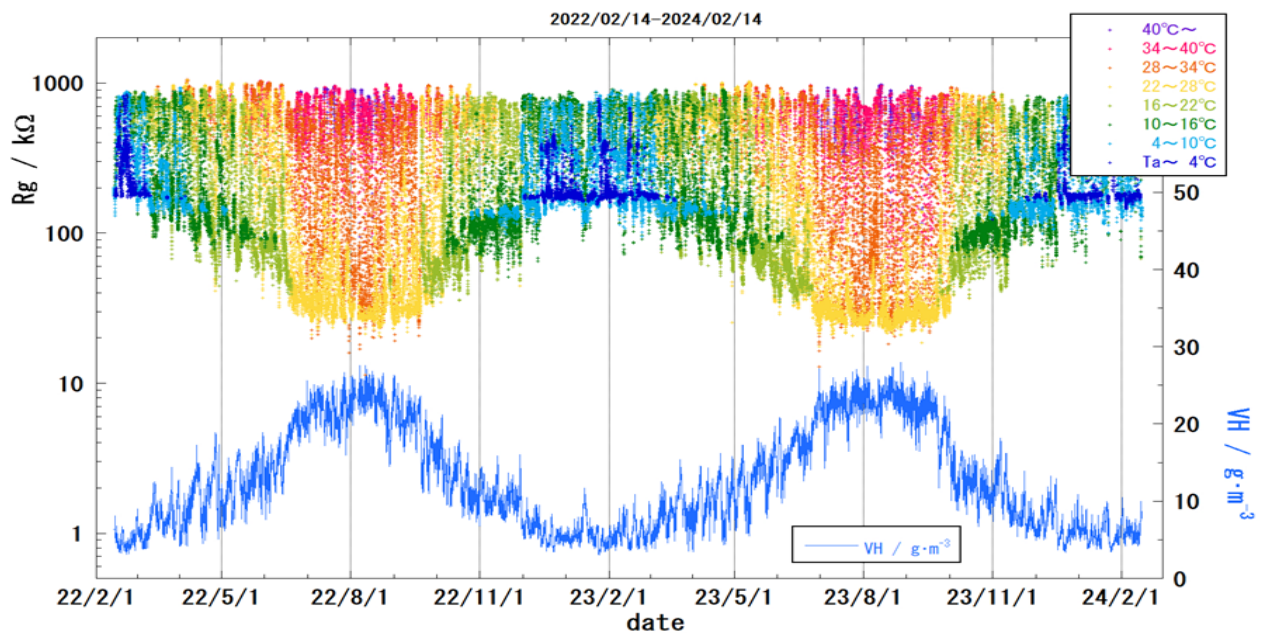


Fig.4 Rg associated with Ta, VH vs. date.

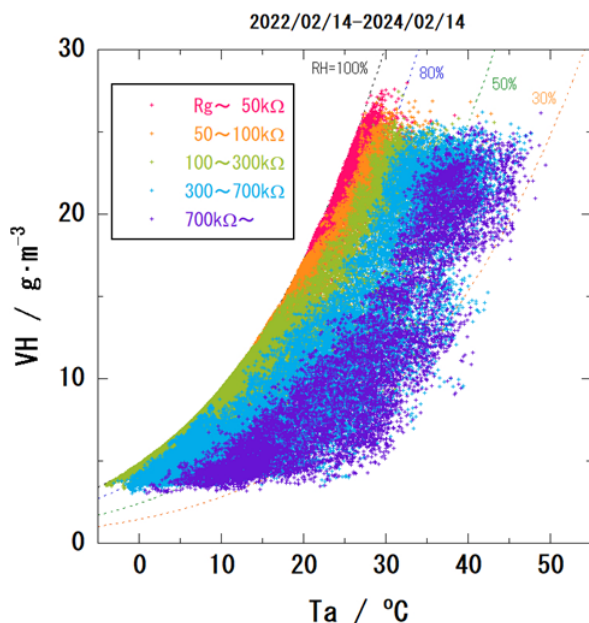


Fig.5 VH associated with Rg vs. Ta.

10 分間平均値を用いた。絶縁抵抗は1日のうちで大きく変化した。気温の低下に伴って低下する傾向（気温と正の相関）にあった。また、日毎の絶縁抵抗の最低値は、容積絶対湿度の増加に伴って減少する顕著な傾向（容積絶対湿度と負の相関）にあった。

4. 考察

絶縁抵抗値と容積絶対湿度、気温、および相対湿度の相関を Fig.5 に示した。容積絶対湿度および気

温は 10 分間平均値を示し、絶縁抵抗値も 10 分間平均値を用いた。相対湿度については 100%, 80%, 50%, 30% となる点を式 (1) により算出して図内に示した。この図より、温度が一定であれば、容積絶対湿度が高い（すなわち空気中の単位体積あたりの水分量が多い）ほど絶縁抵抗値は低下する傾向が見られ、容積絶対湿度が一定であれば、気温が下がるほど絶縁抵抗値が低下する傾向が見てとれる。即ち Fig.5 において上方かつ左方の環境条件になるほど絶縁抵抗値が低下することになる。この図の傾向から、今回の観測範囲を超えて容積絶対湿度が高い状態で気温が低下した場合、より低い絶縁抵抗が観測されることが予想される。換言すると、設備の絶縁抵抗値に真値や最低値などは存在せず、環境条件によって抵抗値は下がり得る余地が常に存在すると考えられる。また、気候の温暖化等により容積絶対湿度が高くなる環境が徐々に増えるなどすると、絶縁抵抗低下における環境による効果と設備の経年劣化による効果との区別は甚だ困難になると予想されることから、改めて述べるまでもないが、観測値の適正な評価のためには絶縁抵抗と環境条件の同時観測は必須である。

今回の絶縁抵抗の観測では、Fig.1(a) に見られるような早朝における絶縁抵抗値の低下により、日出後から約 3 時間後までの間に各日の最低値を得られることが多かった。これは、日射や日射によるモジュール温度の上昇により太陽電池モジュールに付着した露が蒸発する過程で、モジュール表面におい

て容積絶対湿度が局所的に増大した状態が生じた効果と考えられ、Fig5においてモジュール近傍の環境条件が図の左上方へ移行することで絶縁抵抗値が低下したと考えられる。この事象が確認できた例としてFig1(a)の早朝(4:40~7:30)における絶縁抵抗値と環境条件の変動をFig6(a)に示し、この時間帯の容積絶対湿度と気温の変化をFig6(b)に示した。なお、Fig6(a)には10分平均値、Fig6(b)には瞬時値を示した。また、同様の効果は、日中の降雨時あるいは降雨中でも日射が回復した場合にも生じていたと考えられ、Fig1(b), 1(c)やFig2(b)に示したとおり、日中において夜間に到達する値よりも低い値が観測されることもあった。この事象が確認できた例としてFig1(c)の降雨後の日射回復時(14:30~15:00)における絶縁抵抗値と環境条件の変動をFig7(a)に示し、この時間帯の容積絶対湿度と気温の変化をFig7(b)に示した。さらに、

日中に降雨が発生した場合も、モジュール上に落ちた雨滴が蒸発する過程でモジュール表面において容積絶対湿度が局所的に増大した状態が生じ、加えて蒸発によりモジュール温度およびモジュール近傍の気温が低下する効果も重なって絶縁抵抗値が低下すると考えられる。この場合も先の例と同様にFig5において環境条件が図の左上方へ移行しており、この事象が確認できた例としてFig1(c)の降雨時(13:50~14:10)における絶縁抵抗値と環境条件の変動をFig8(a)に示し、この時間帯の容積絶対湿度と気温の変化をFig8(b)に示した。

Fig1(a), 1(b), 1(c)およびFig2(a), 2(b)に示したとおり、夜間は降雨の有無によらず各日の最低値に近い値を得られる機会が多く存在する。夜間においては、好天時でもモジュールが結露する場合が多いことや、降雨の有無によらず気温やモジュール温度が比較的低く安定するためと考えられる。し

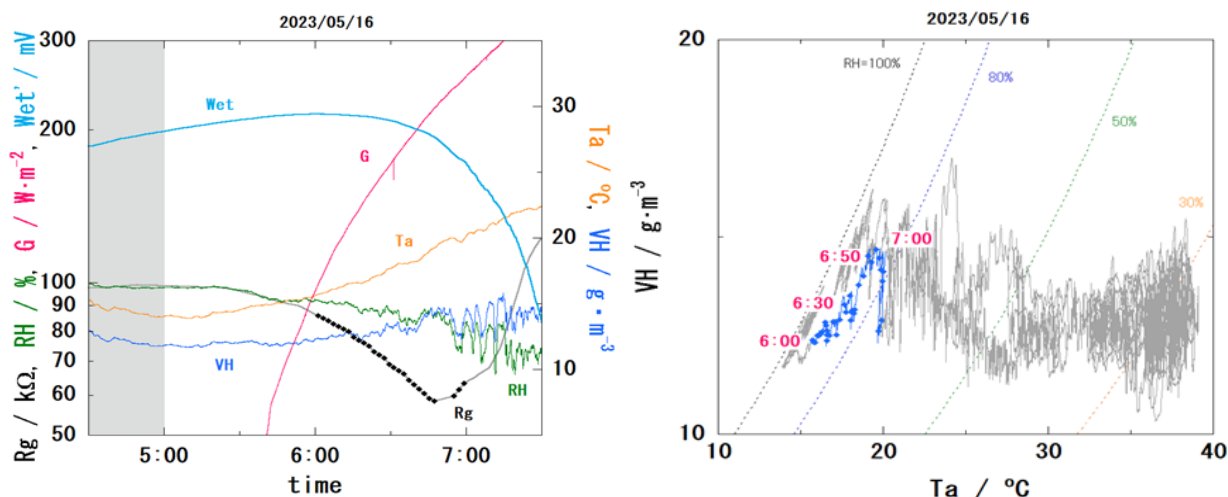


Fig.6 On 16th May, 2023, (a) Rg, G, Ta, RH, VH, Wet vs. time, (b) VH vs. Ta.

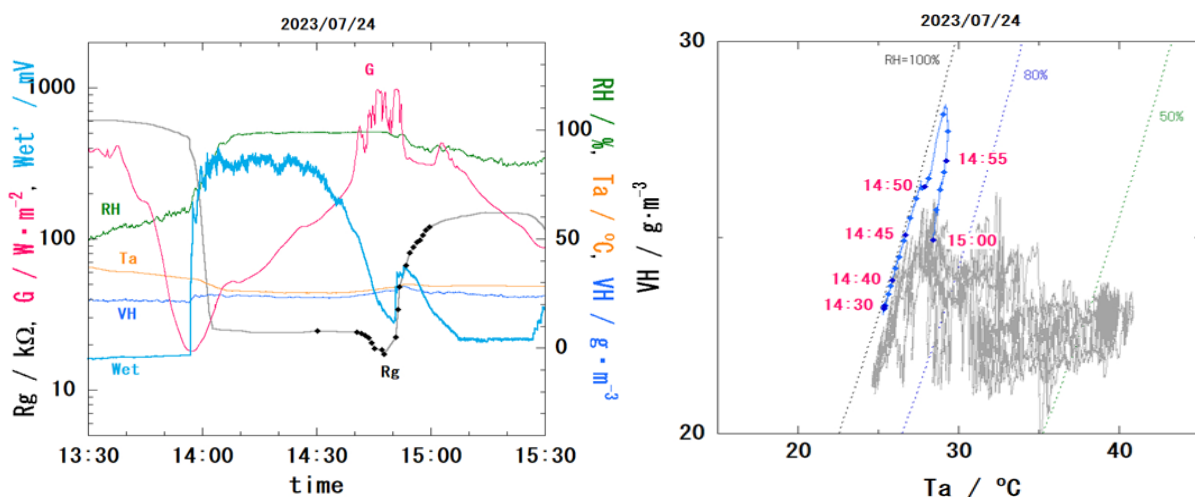


Fig.7 On 24th July, 2023, 14:30-15:00, (a) Rg, G, Ta, RH, VH, Wet vs. time, (b) VH vs. Ta.

たがって、太陽光発電設備における低抵抗な状態をモニタリングする方法として、夜間における観測は有効な手法のひとつと考えられる。先に述べたとおり、常時監視等による最低値の取得はさほど重要ではなく、各日の最低値に近い値を得られれば十分有意義であるが、環境は夜間にも少なからず変化して

絶縁抵抗値が大きく変動する場合もあることから、複数回の測定を実施した中の最低値を収集することで、各日の最低値に近い値を得ることが可能と考えられる。例として、観測期間中における 21 時, 0 時, 3 時の絶縁抵抗値を Fig.9 に示し、その 3 点のうちの最低値と実際の各日の最低値の比較を Fig.10 に

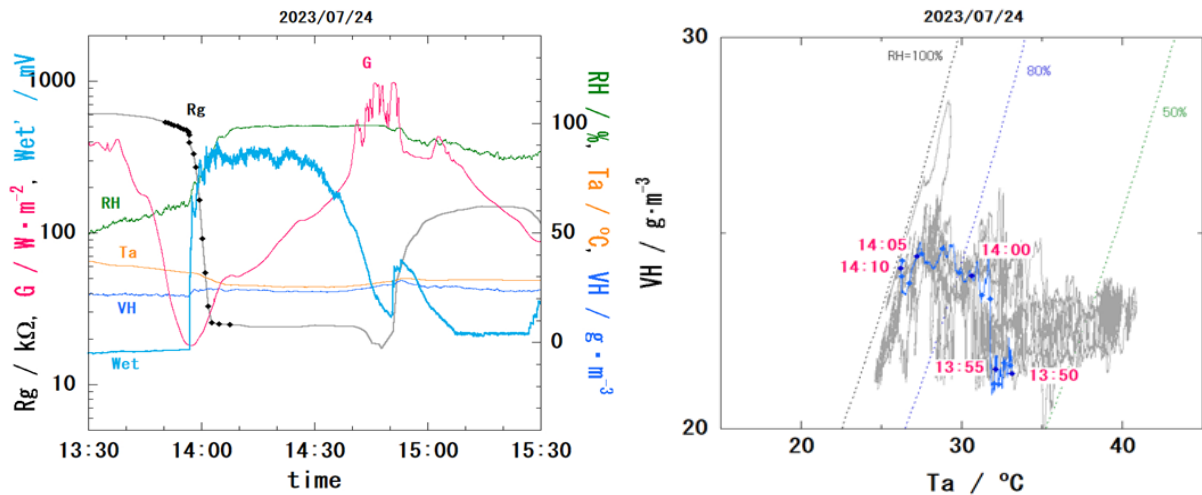


Fig.8 On 24th July, 2023, 13:50-14:10, (a) Rg, G, Ta, RH, VH, Wet vs. time, (b) VH vs. Ta.

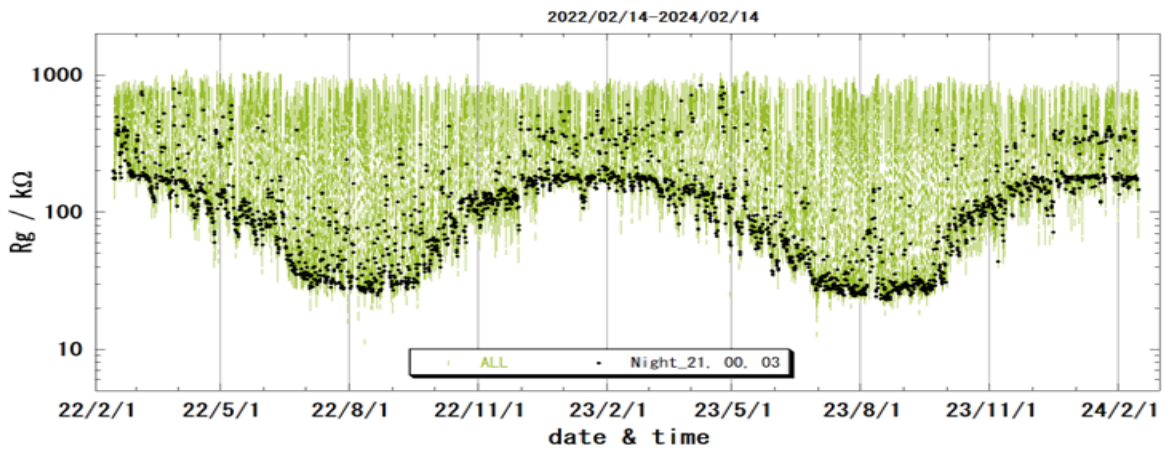


Fig.9 Rg measured at 21:00, 0:00 and 3:00

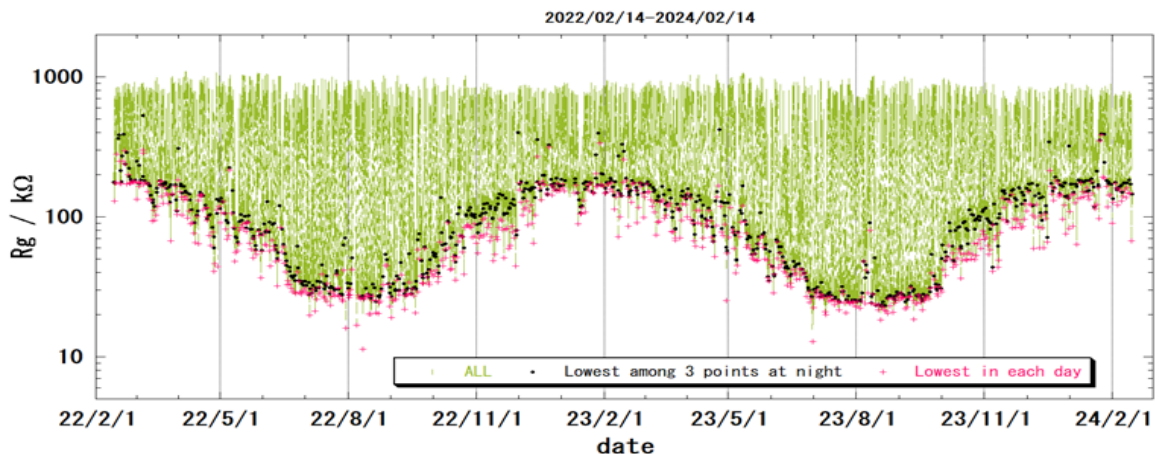


Fig.10 Lowest Rg ; among 3 points during night vs. in each day.

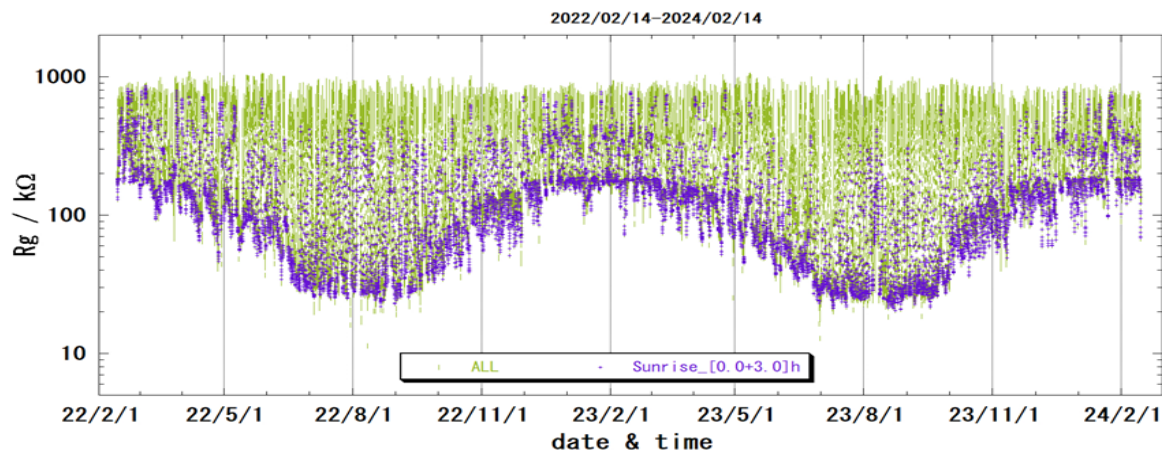


Fig.11 Rg measured from sunrise to 3 hours after sunrise.

示した。また、Fig6(a)に見られるように、早朝に各日の絶縁抵抗値の最低値が得られる機会も多く存在することから、日出後から約3時間後までの時間帯に数回の観測を実施した中の最低値を収集することもモニタリングとして有効な方法のひとつと考えられる。観測期間中における日の出から3時間後までに観測された絶縁抵抗値をFig.11に示した。

5. まとめ

香川県のため池に設置された女井間池水上太陽光発電所において、絶縁抵抗値および環境条件の観測を実施した。約2年分の観測データの分析では、絶縁抵抗値が気温と正の相関、容積絶対湿度と負の相関を示すことが明らかとなった。この相関が示すとおり、絶縁抵抗値の日変化では、気温が低い夜間や容積絶対湿度が増加する降雨時に低下していたほか、モジュール周辺に水蒸気が発生することで容積絶対湿度が局所的に増加すると考えられる日照中の降雨時や降雨中あるいは降雨後の日射の回復時、また露が蒸発する早朝に極端に低下していた。絶縁抵抗値の季節変化では、容積絶対湿度が増加しつつも気温が下がる夏季（6月下旬から9月中旬）の早朝に低い値が観測される頻度が高く、容積絶対湿度が比較的lowかつ気温も比較的高くなる春季（4月から5月）の日中に非常に高い値が観測される頻度が高かった。太陽光発電設備における低抵抗な状態をモニタリングする方法として、夜間および早朝における観測例を示したが、その実用性の検証は今後の課題である。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP20015）の結果として得られました。また、実験場所を供与いただいた三井住友建設株式会社ならびに観測装置の取り付け及びメンテナンスにご協力いただいた三菱電機システムサービス株式会社の両社に深謝いたします。また、観測データの整理を担当いただいたFREA・横山陽ならびに高尾俊司の両氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本電機工業会・太陽光発電協会 技術資料, 太陽光発電システム保守点検ガイドライン, 102, 123, 2019年12月.
- 2) 国立天文台, 暦計算室, 各地のこよみ, <https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/>
- 3) 日本気象協会, ALiNK インターネット, <https://tenki.jp/>
- 4) 菅原広史, 近藤純正, 飽和水蒸気圧の計算誤差, 水文・水資源学会誌 7 (1), 440-443 (1994)

著者略歴



池田 一昭（いけだ かずあき）
産総研・福島再生可能エネルギー研究所 テクニカルスタッフ
1999 年総合研究大学院大学数物科学研究科修了。2008 年より産総研つくばセンター，2020 年より福島再生可能エネルギー研究所に勤務。



高島 工（たかしま たくみ）
1992 年工業技術院電子技術総合研究所（現：国立研究開発法人産業技術総合研究所）入所。2020 年より産総研福島再生可能エネルギー研究所に勤務。



大関 崇（おおぜき たかし）
2005 年産業技術総合研究所入所。2015～2017 年経済産業省新エネルギー課出向。現在，再生可能エネルギー研究センター太陽光システムチーム研究チーム長，太陽光発電システムの研究開発に従事。