

# A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground (3) - Some conclusions based on one-year outdoor measurement and a proposal of PV array design for preventing electrical shock -

Kazuhiko KATO<sup>‡</sup>

## 太陽電池モジュール / スtringと大地の間の等価回路の提案 (3)

- 一年間の屋外測定を経た本研究の総括,  
そして感電リスク予防のためのアレイ設計法の一試案の提示 -

加藤 和彦<sup>‡</sup>

### Abstract

To promote practical discussion on electrical risk of photovoltaic power generation plants such as fire and electrical shock caused by decrease in insulation resistance between photovoltaic module/string and the ground, author has proposed a new theory for the equivalent circuit of the photovoltaic module/string against the ground based on one-year outdoor measurement with three kinds of photovoltaic modules. This equivalent circuit consists of seven RC-components, each of which has different attenuation frequencies ranging from  $10^5$ Hz to  $10^{-3}$ Hz. The RC-component with  $10^5$ Hz-frequency has extremely low resistance. On the other hand, the RC-component with  $10^{-3}$ Hz-frequency has high resistance.

By applying both this equivalent circuit theory of PV module/string against the ground and the upper limit of human body charge, author has also suggested a PV array design theory to prevent unexpected electrical shock assuming wet condition. Maximum permissible number of strings in parallel is strongly restricted by square of number of modules in series, in other words, system voltage. Therefore, high system voltage should not be recommended from a viewpoint of electrical safety even though the high voltage has economical advantage for the photovoltaic power generation plant.

**Keywords:** PV module string, Equivalent circuit against the ground, Electrical shock, Rain condition, Array design  
キーワード: 太陽電池モジュールString, 対地等価回路, 感電, 降雨, アレイ設計

### 1. 緒言

筆者は太陽光発電設備の直流電気安全リスクに関する議論の礎として「太陽電池モジュール / Stringー大地」間の等価回路理論を探求し、300秒までの時間領域における屋内実験にもとづいた第1報「太陽電池モジュール / Stringと大地の間の等価回路の提案」<sup>1)</sup>において「太陽電池モジュール / Stringー大地」間は五つのRC直列回路(減衰項)と一つの対地抵抗(収束項)で説明できるという仮説を提唱した。さらに、0.5秒までの時間領域を対象とした屋外実験にもとづ

く第2報「太陽電池モジュール / Stringと大地の間の等価回路の提案(2)-高速減衰項に関する仮説の修正と屋外測定による各回路素子の推定-」<sup>2)</sup>では、第1報において周波数1Hz未満と解釈していた二つの減衰項の本質は四つの減衰項として解釈するのが妥当であることを示した。

つまり「300秒までの観測時間」を対象としたこれら二報から導かれる「太陽電池モジュール / Stringー大地」間の等価回路理論に関する仮説は「減衰周波数(時定数)の異なる七つのRC直列回路(減衰項)と一つの対地抵抗(収束項)の並列構成」である。

Senior Researcher, Photovoltaic System and Application Team,  
Renewable Energy Research Center, Fukushima Renewable Energy  
Institute, AIST  
2-2-9 Machiikedai, Koriyama, Fukushima, 963-0298, Japan  
<sup>‡</sup>e-mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

Received: December 13 2024, Accepted: February 2 2025

国立研究開発法人産業技術総合研究所  
福島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 主任研究員  
(〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9)  
<sup>‡</sup>e-mail: kazuhiko.kato@aist.go.jp

(原稿受付: 2024年12月13日, 受理日: 2025年2月2日)

しかし、なお疑念がある——300 秒という有限の観測時間の測定データからの解釈に収束項を含めることは妥当なのか、もし観測時間を無限にとったならば新しい減衰項 (RC 回路) が現れるのではないか。

如上の疑念を棄却することができないため、太陽電池モジュール/ストリングの対地等価回路に関する現時点での最終仮説を次のとおりとした——「300 秒の観測時間範囲では、「太陽電池モジュール/ストリングー大地」間は減衰周波数(時定数)の異なる七つの RC 直列回路(減衰項)の並列構成で説明できる」。

筆者はこの最終仮説を前提とし、モジュール種類の異なるストリングの「ストリングー大地」間の屋外での 300 秒間の挙動をおよそ 1 年にわたって測定し分析してきた。

本報は、これら一連の研究の総括として、いくつかの論点からの上記測定データの分析と考察の結果を報告するものである。具体的には、モジュール種類による対地等価回路の差異の有無に関する論点、屋内実験の第 1 報でも言及した七つの減衰項の各回路素子値の屋外での絶対容積湿度依存性に関する論点、受光面ガラスが割れたモジュールの挙動に関する論点、そして、第 2 報で予備的に言及した降雨下での挙動と感電リスクを低減するためのアレイ設計方法に関する論点、である。

## 2. 測定と分析の方法

### 2.1 測定対象

測定対象は第 2 報<sup>2)</sup>と同様に三種類の結晶 Si 系モジュールを 8 枚直列に接続して屋外に設置したストリング(「正常ストリング」)である。各モジュールの公称値と寸法は Table1 に示すとおりである。ストリングは非接地である一方でモジュールフレームは金属架台および杭基礎との直接接触により大地と接続している。

なお Panasonic については上記正常ストリングとは別に、Fig.1 のように受光面ガラスが全損しているモジュール 1 枚を含むストリング(「ガラス割れストリング」)も測定対象とする。ガラス全損の原因は不明だが時期は本測定期間の 4 年程度前である。

Table 1 Three kinds of PV modules used for the experiment

	Panasonic	Toshiba	Kyocera
Type	mc-Si(HIT)	mc-Si	pc-Si
$P_{MAX}$ [W]	238.1	250	242
$V_{PM}$ [V]	43.4	30.95	29.8
$I_{PM}$ [A]	5.5	8.07	8.13
$V_{OC}$ [V]	52.2	37.9	36.9
$I_{SC}$ [A]	5.85	8.62	8.80
Dimension			
Length [m]	1.58	1.65	1.66
Width [m]	0.812	0.901	0.990
Depth[mm]	35	40	46

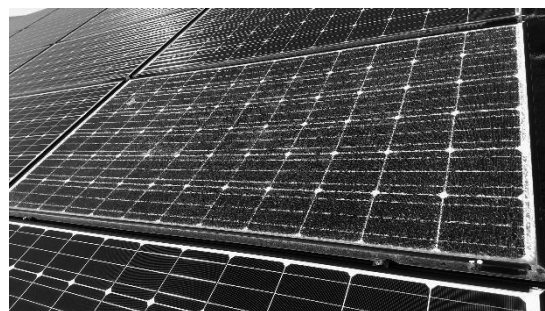


Fig.1 A front view of the glass-broken module used in this experiment (Panasonic)

### 2.2 測定の方法

2.2.1 短時間領域 ( $0 \leq t \leq 1\text{sec}$ ) (測定期間: 2024 年 1 月から 11 月まで) 短時間領域の測定は降雨の有無によらず第 2 報<sup>2)</sup>と同様である。すなわちストリングの開放電圧 ( $V_{OC}$ ) を印加電圧源とした測定用抵抗  $R_{sh}$  ( $\approx 500\Omega$ ) による正極端および負極端と大地間の対地電圧 ( $v_{pe}(t)$ ,  $v_{ne}(t)$ ) の測定(「自己バイアス測定」)である。測定には二種類のローパスフィルタ LPF ( $R_f \approx 510\Omega$ ,  $C_f \approx 227/1820\text{nF}$ ) (第 2 報における "middle" および "slow") を利用する。データ測定間隔は雨の降っていない環境では  $2\mu\text{sec}$  あるいは  $5\mu\text{sec}$ 、降雨下では  $10\mu\text{sec}$  である。

なお、降雨下では測定後の対地静電容量の放電に相当の時間を要することが予備測定で確認されたため、各測定は 30 分以上の時間を空けて実施する(雨が降っていない環境では 1 分程度)。

2.2.2 長時間領域 ( $0 \leq t \leq 300\text{sec}$ ) (測定期間: 2023 年 10 月から 2024 年 12 月まで) 雨が降っていない環境では、短時間領域の場合と同様に測定用抵抗  $R_{sh}$  ( $\approx 1\text{k}\Omega$ ) による自己バイアス測定を行う。他方降雨下では対地静電容量の放電のための待機時間を挟んだ二度の自己バイアス測定を避けるため、短絡したストリングと大地の間に外部から 500V 程度を印加し、前述の測定用抵抗でストリングと大地の間の電圧  $v_{sh}(t)$  を測定する(「外部バイアス測定」)。

どちらの場合もデータ測定間隔は  $1\text{msec}$  であり、測定にはロガー内蔵の LPF (カットオフ周波数 =  $1.5\text{Hz}$ ) を利用する。

なお、すべての測定に共通して日射強度のほかに外気温 ( $T_a$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]) と相対湿度 ( $RH$  [%]) を測定し、それらから算出される 1 気圧を前提とした容積絶対湿度 (Volumetric Humidity:  $VH$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]) も記録する。

### 2.3 パラメータ・フィッティングの方法

測定データのパラメータ・フィッティングは既報同様マイクロソフト・エクセルの Solver アドインによる。

「自己バイアス測定」の場合は、第 2 報の(5)式を用いて測定データから減衰項の抵抗成分と静電容量成分を推定する。ただし、冒頭で論じたように本稿では収束項は考慮せず減衰項のみを仮定し、かつ  $R_{sh} \ll R_{a,j}/S$  を前提とする。すなわち

$$v_{pe}(t) + v_{ne}(t) =$$

$$R_{sh} \cdot V_{OC} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j}t} - e^{-\omega't}) \quad (1)$$

ただし、 $V_{OC}$  : スtring開放電圧 (実測) [V]

$n$  : 想定する減衰項の数

$S$  : モジュールの直列接続枚数

$\omega' = \frac{1}{(R_{sh} + R_f)C_f}$  : LPFの実効減衰周波数 [Hz]

$\omega_{a,j} = \frac{1}{R_{a,j}C_{a,j}}$  : 第  $j$  減衰項の減衰周波数 [Hz]

$R_{a,j}$  : 第  $j$  減衰項の抵抗成分 [ $\Omega$ /モジュール]

$C_{a,j}$  : 第  $j$  減衰項の静電容量成分 [F/モジュール]

同様に「外部バイアス測定」の場合には以下の式を用いてパラメータ・フィッティングを行う。

$$v_{s\delta}(t) = R_{sh} \cdot E \cdot \sum_{j=1}^n \frac{S}{R_{a,j}} \cdot \frac{\omega'}{\omega' - \omega_{a,j}} (e^{-\omega_{a,j}t} - e^{-\omega't}) \quad (2)$$

ただし、 $E$  : 外部から印加する電圧 (=538V)

どちらの場合も対地絶縁抵抗  $Z_g(t)$  は以下の(3)式に帰結する。

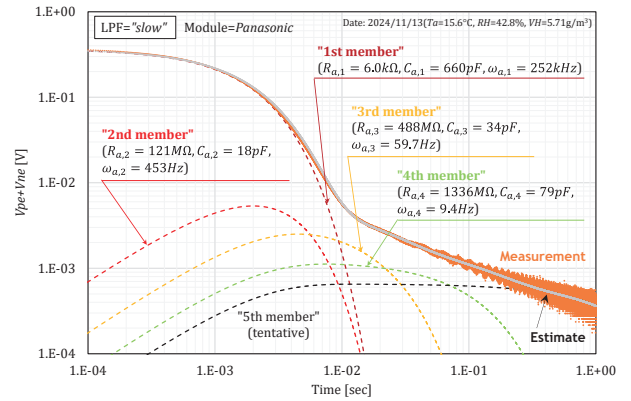
$$\frac{1}{Z_g(t)} = s \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{a,j}} e^{-\omega_{a,j}t} \quad (3)$$

なお、第2報で示したように短時間領域では測定時間内に減衰する項は四つ(第1減衰項~第4減衰項)であるが、測定データには測定時間内に減衰が終わらない項が含まれるためこれを暫定第5減衰項とし  $n=5$  とする。他方、長時間領域で観測される減衰項は三つ(第5減衰項~第7減衰項)であるが、LPF(カットオフ周波数 1.5Hz)の効果により  $t < 1\text{sec}$  で消滅するダミー項を表現できるようにするため  $n=4$  とする。

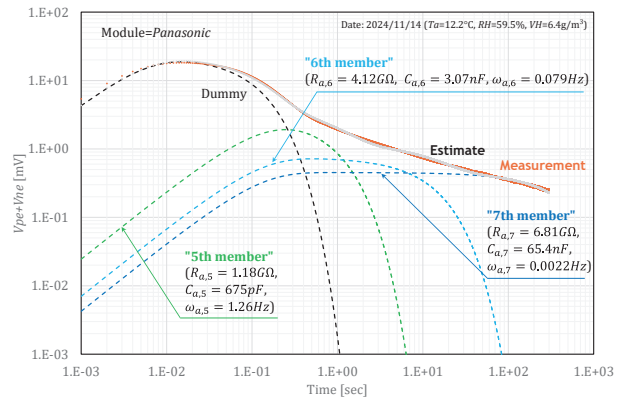
### 3. 測定結果とその分析

#### 3.1 雨が降っていない環境の場合

3.1.1 正常String Fig.2に示したのは、Panasonic 正常Stringの短時間領域(a)と長期間領域(b)の測定波形とそのパラメータ・フィッティング結果の一例である。前者では減衰の速い四つの減衰項(第1減衰項~第4減衰項)と減衰が未了である暫定第5減衰項に観測波形が分解され、後者では減



(a) Short-time measurement ( $0 \leq t \leq 1\text{sec}$ )



(b) Long-time measurement ( $0 \leq t \leq 300\text{sec}$ )

Fig.2 An example of  $v_{pe}(t) + v_{ne}(t)$  measurement and its fitting result (module= Panasonic, no rain)

衰の遅い3つの減衰項(第5減衰項~第7減衰項)に観測波形が分解されている。

3種類の正常Stringに対してこのような測定とパラメータ・フィッティングを行った。Fig.3は測定時の平均容積絶対湿度  $VH$  を説明変数として、Panasonic 正常Stringの測定データから得られた減衰項の  $R_{a,j}$ ,  $C_{a,j}$  および  $\omega_{a,j}$  の値を図示したものである。この図からわかることは以下のとおりである：

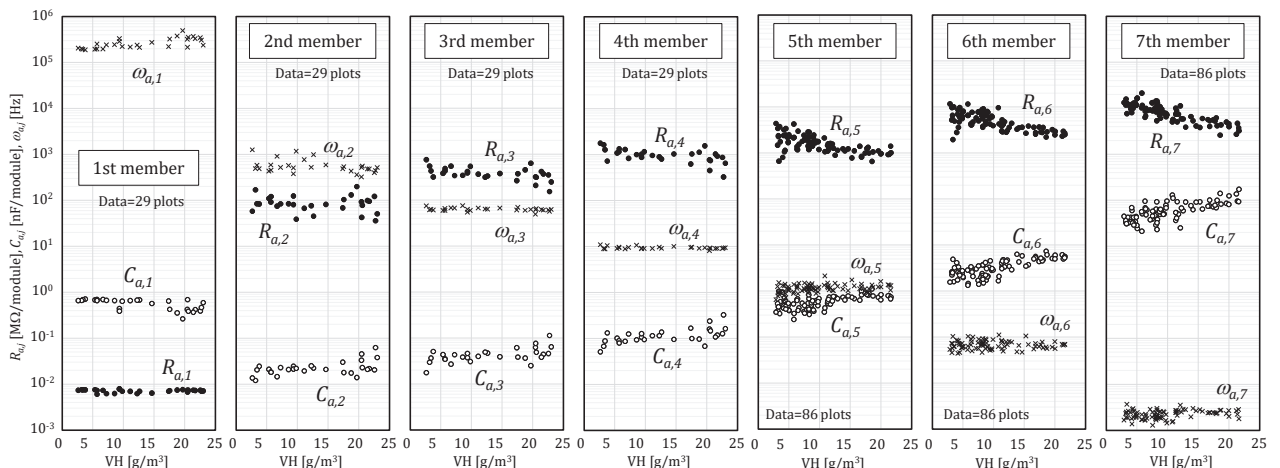


Fig.3 Estimates of RC-components of the Panasonic PV module under various  $VH$  conditions (No Rain)

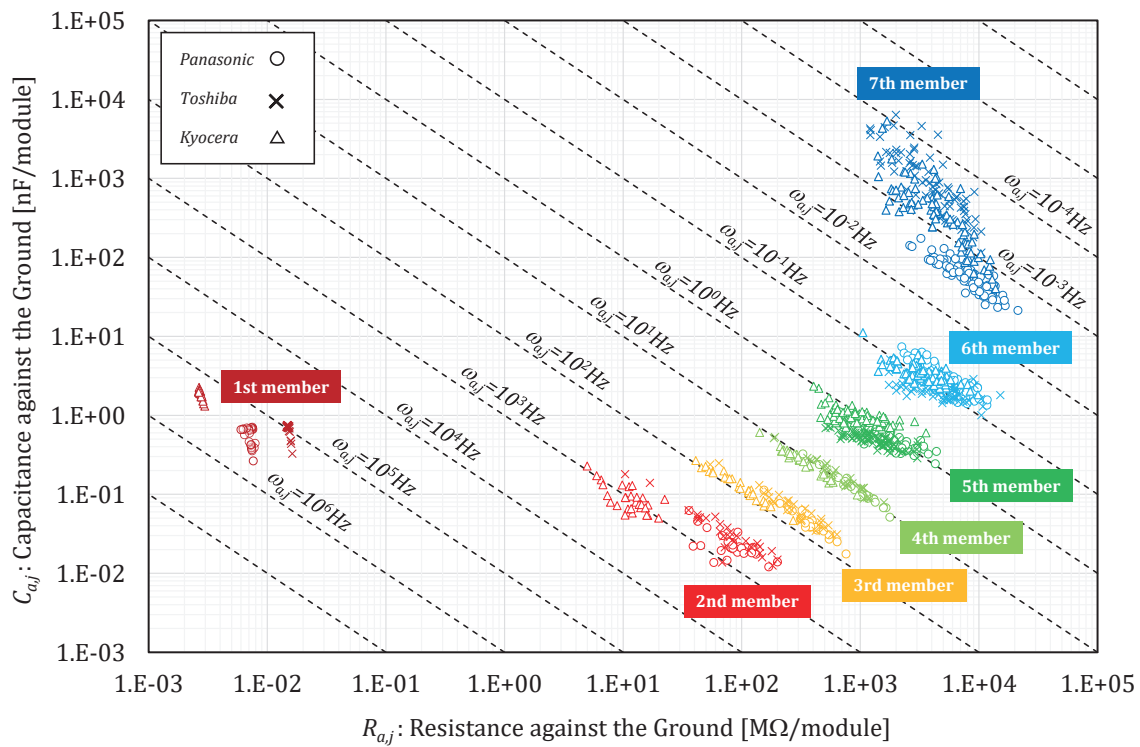


Fig.4 Estimates of RC-components of each the PV modules (No Rain)

・第1報の屋内測定の結果と同様に、どの減衰項も減衰周波数 $\omega_{a,j}$ は概ね一定、つまり容積絶対湿度の影響をうけていない。そして、その値は各項で顕著に異なる。すなわち最も大きい第1減衰項は $\omega_{a,1} \approx 300\text{kHz}$ であるから一瞬にして $C_{a,1}$ への充電が終わる。これに対し第2減衰項以降は $\omega_{a,2} \approx 600\text{Hz}$ ,  $\omega_{a,3} \approx 60\text{Hz}$ ,  $\omega_{a,4} \approx 10\text{Hz}$ ,

$\omega_{a,5} \approx 1\text{Hz}$ ,  $\omega_{a,6} \approx 0.07\text{Hz}$ と桁違いに小さくなっていき、最も小さい第7減衰項は $\omega_{a,7} \approx 0.002\text{Hz}$ である。これは時定数にしておよそ500secであるから $C_{a,7}$ への充電が終わるまでに約1時間が必要となる。

・減衰が速い項ほど抵抗成分が小さく、特に $R_{a,1}$ は $7\text{k}\Omega/\text{module}$ 程度と顕著である。他方で第2減衰項以降は抵抗成分が $100\text{M}\Omega/\text{module}$ のオーダーから

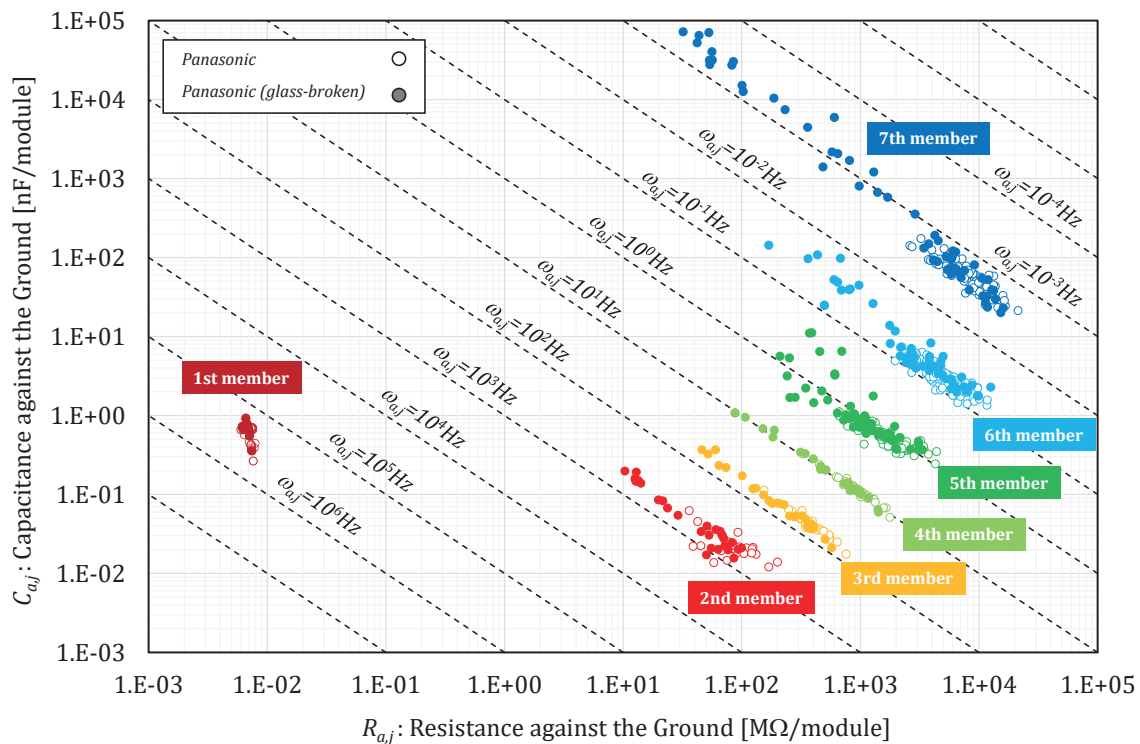


Fig.5 Estimates of RC-components of the Panasonic PV module (glass-broken, no rain)



1000MΩ/module のオーダーへと徐々に増加している。  
 ・ $R_{a,1}$ と $C_{a,j}$ に容積絶対湿度依存性は見られないが、第2減衰項以降は徐々に容積絶対湿度の影響がみえてきている。すなわち静電容量成分は容積絶対湿度と正の相関を示し、逆に抵抗成分は負の相関を示す。

なお、Panasonic モジュールに確認された上記の傾向は他の Toshiba モジュールや Kyocera モジュールストリングでも同様であった。

Fig.4 は、Panasonic、Toshiba および Kyocera モジュールそれぞれの分析結果を「 $R_{a,j}-C_{a,j}$ 平面」上にプロットしたものである。この図から測定対象とした3種類のモジュールのどれも減衰項は七つであり、各減衰項の抵抗成分および静電容量成分の値に大きな差異はみられない。また、どの減衰項も環境条件によって抵抗成分と静電容量成分の値は変化するが概ね同じ減衰周波数上を移動している。

あえて違いを挙げるならば第7減衰項である。Toshiba モジュールや Kyocera モジュールは Panasonic モジュールに比べて抵抗成分( $R_{a,7}$ )がやや小さく静電容量成分( $C_{a,7}$ )が大きくなっており、その結果減衰周波数( $\omega_{a,7}$ )が小さくなっている。

3.1.2 ガラス割れストリング Panasonic ガラス割れストリングの測定・分析結果を前掲の Panasonic 正常ストリングのそれとともに「 $R_{a,j}-C_{a,j}$ 平面」上にプロットしたものを Fig.5 に示す。

まず、減衰の最も速い第1減衰項にほとんど変化がみられないことから、ガラス割れ事象はこの項には無関係であることがわかる。その一方で他の減衰項は概ね同じ減衰周波数上において「低抵抗-高静電容量」側に移動している場合がみられる。すなわち第2減衰項以降は多かれ少なかれガラス割れ事象にตอบสนองしており、この傾向は減衰の遅い項ほど顕著で

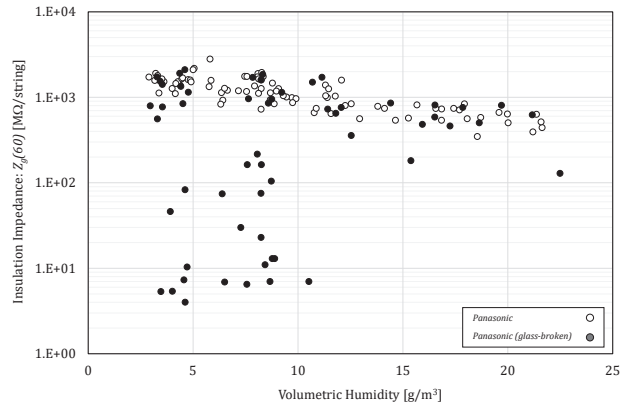


Fig.6 Calculated insulation impedance  $Z_g(60)$  of both Panasonic string with and without glass-broken module (No rain)

ある。

ただし、正常ストリングと差異がない、言い換えれば、ガラス割れ事象にตอบสนองしていない場合もあることには注意が必要である。つまりガラスが割れていてもそれが対地絶縁抵抗の測定値に顕在しない場合もあることを示している。Fig.6 は、Fig.5 の各パラメータ・フィッティング結果と(3)式を用いて計算したストリング対地絶縁抵抗の60秒経過値( $Z_g(60)$ )を図示したものである。この図からわかるように、ガラス割れストリングでも正常ストリングと同等の値を示す場合がある。

### 3.2 降雨下での正常ストリング

正常 Panasonic ストリングおよび Toshiba ストリングについては降雨下での測定と分析も実施した。Fig.7 は正常 Panasonic ストリングの分析結果を前掲の雨が降っていない環境のそれとともに「 $R_{a,j}-C_{a,j}$ 平面」上にプロットしたものである。

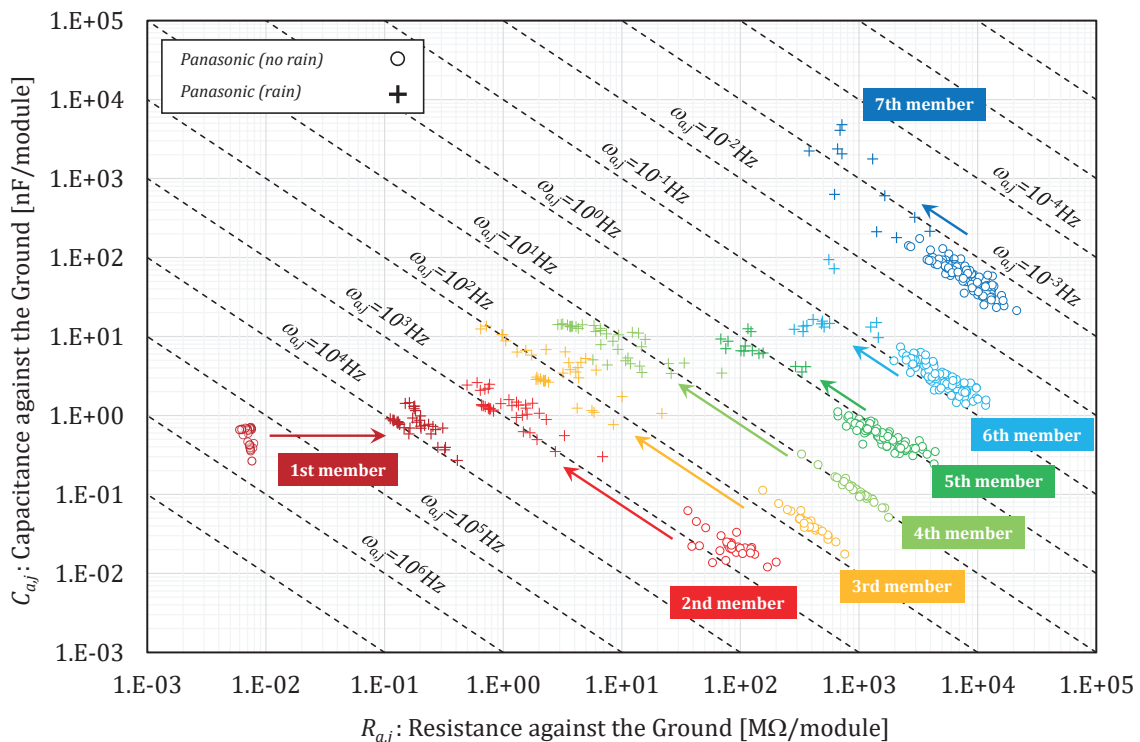


Fig.7 Estimates of RC-components of the Panasonic PV module (Rain and no rain)

この場合も減衰の最も速い第 1 減衰項とその他の減衰項とで挙動が異なる。第 1 減衰項は降雨により抵抗成分のみが増加し減衰周波数が小さくなる(減衰が遅くなる)。これに対し降雨下での第 2~7 減衰項はやはり概ね同一減衰周波数上を「低抵抗-高静電容量」側に移動している。そして、その移動幅は減衰の速い第 2~4 減衰項で特に大きく、大まかには抵抗成分が二桁下がり静電容量成分が二桁上がっている。

#### 4. 感電リスクに関する考察

ストリングあるいはアレイにおける感電リスクに関しては第 2 報で予備的な考察を行ったが、本稿では第 3 章で得られた短時間領域での分析結果を用いてアレイの設計段階における感電リスク対策の一案を提示する。具体的には人体通過電荷量の安全限界の考え方を導入する。

ドイツのケッペンハインは人体通過電流の安全限界として電流時間積  $50\text{mA}\cdot\text{sec}(=5\text{mC})$  を提唱し、欧州やわが国ではそれをより厳しくとらえ安全限界を  $30\text{mC}$  としている<sup>3)4)</sup>。

そこで、モジュールが直並列に接続されるアレイの設計においても、ヒトが感電した場合に想定される最大の人体通過電流の時間積、つまり人体通過電荷量  $q_h(t)$  が  $30\text{mC}$  を超えないようモジュールの直並列数(=モジュール枚数=アレイ容量)の上限を定め、これをアレイの設計に反映させることにより、太陽光発電設備によるヒトの感電リスクを低減させることを考える。

##### 4.1 人体通過電荷量 $q_h(t)$

第 2 報でも示したように、アレイ回路が非接地でアレイを構成する個々のモジュールの対地成功成分および対地静電容量成分が同じであると前提した場合、降雨下において大地との電位差が最も大きい正極端あるいは負極端と大地をヒトが接続(接触)した場合に感電リスクがもっとも高くなる。ヒトの接触がステップ関数的であると仮定した場合のこの時の人体通過電流  $i_h(t)$  は以下の式で表される。

$$i_h(t) = \frac{PS^2 \cdot v_{OC}}{2} \times \sum_{j=1}^5 \frac{1}{S \cdot R_h + R_{a,j}} e^{-\omega'_{a,j} t} \quad (4)$$

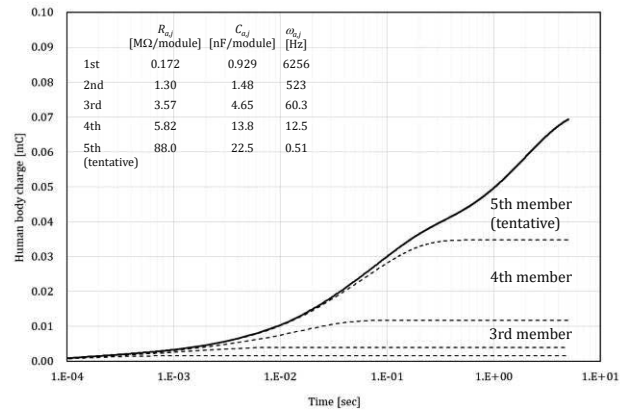
ここで、 $R_h$ : ヒトの電気抵抗 [ $\Omega$ ]  
 $v_{OC}$ : モジュールの開放電圧 [V/module]  
 $P$ : アレイのストリング並列数  
 $\omega'_{a,j} = \frac{1}{(S \cdot R_h + R_{a,j}) \cdot C_{a,j}}$

$R_h$  は最低状態である「全身が濡れた状態」を想定すると  $500\Omega$  程度である<sup>5)</sup>。他方、3.2 節の議論から降雨時で抵抗成分が最も小さい第 1 減衰項の抵抗値は  $100\text{k}\Omega$  程度である。したがって、モジュールの直列数  $S$  が極端に大きくないと仮定すれば、

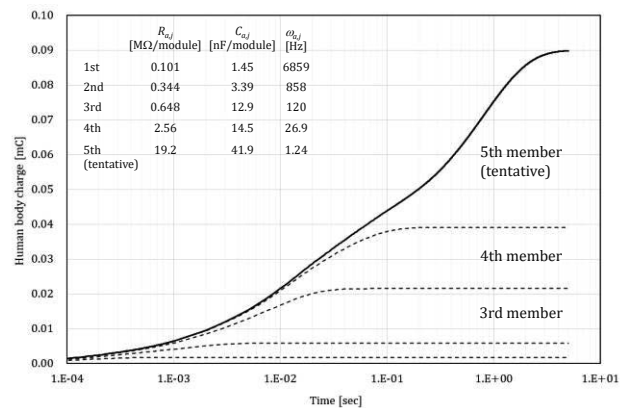
$$S \cdot R_h + R_{a,j} \approx R_{a,j}$$

であるから、(4)式は以下のように書き換えることができる。

$$i_h(t) = \frac{PS^2 \cdot v_{OC}}{2} \times \sum_{j=1}^5 \frac{1}{R_{a,j}} e^{-\omega_{a,j} t} \quad (4)'$$



(a) Panasonic module



(b) Toshiba module

Fig.8 Some estimates of human body charge  $q_h(t)$  of 8-series PV string under rain condition

すると接触してから  $T$  秒の間に人体を通過する電荷量(人体通過電荷量)  $q_h(T)$  [C] は以下の式となる。

$$q_h(T) = \int_0^T i_h(t) dt = \frac{PS^2 \cdot v_{OC}}{2} \sum_{j=1}^5 C_{a,j} (1 - e^{-\omega_{a,j} T}) \quad (5)$$

正常 Panasonic ストリングと Toshiba ストリングの降雨下での複数の分析結果のうち  $q_h(3)$  が最大となった場合の  $R_{a,j}$  と  $C_{a,j}$  の値を用いて、8 枚直列ストリングの  $q_h(t)$  の時間変化を示したものが Fig.8 である。

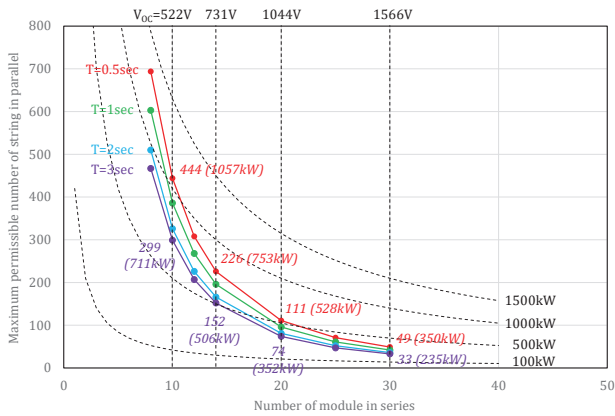
どちらも接触してから  $100\text{msec}$  程度までは第 3 減衰項と第 4 減衰項が支配的であり、それ以降は減衰周波数が  $1\text{Hz}$  程度と遅い暫定第 5 減衰項の寄与が徐々に大きくなる。

このように、瞬間的事象である「感電」というリスクに関しては  $60$  秒経過値として記録される第 7 減衰項ではなく、きわめて短時間に充電が終わる第 5 減衰項までの RC 回路の挙動が重要である。

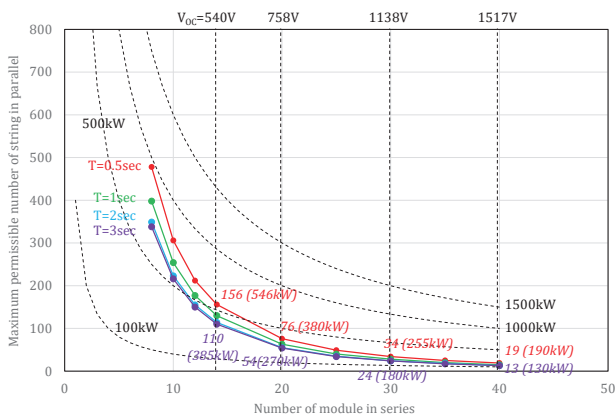
##### 4.2 最大許容ストリング並列数の試算例

前記したように人体通過電荷量の上限を  $30\text{mC}$  とすると、(5)式からモジュールの直列枚数  $S$  とストリング並列数  $P$  は以下の条件を満足しなければならない。

$$\frac{PS^2 \cdot v_{OC}}{2} \sum_{j=1}^5 C_{a,j} (1 - e^{-\omega_{a,j} T}) < 30\text{mC} \quad (6)$$



(a) Panasonic module



(b) Toshiba module

Fig.9 Estimated maximum permissible number of string in parallel under various number of module in series

Panasonic モジュールと Toshiba モジュールのそれぞれについて、Table1 の定格開放電圧と Fig.8 中の各減衰項の抵抗成分および静電容量成分の値を用い、異なる接触時間  $T$  と直列枚数  $S$  に対して(6)式を満足する最大許容ストリング並列数  $P_M$  を計算した結果を Fig.9 に示す。図中の括弧内の数値は各最大許容並列数でのアレイ容量(最大許容アレイ容量)である。

(6)式からわかるようにモジュール直列枚数  $S$  は二乗で作用するため、 $S$  を増やすと  $P_M$  は顕著に減少する。例えば Panasonic モジュールで  $S=10$  ( $V_{oc}=522V$ ) の場合、 $P_M$  は 299~444 (711~1057kW) であるが、 $S=30$  ( $V_{oc}=1566V$ ) にすると  $P_M$  は 33~49 (130~190kW) となる。すなわち、ストリング電圧を高くするほど接続可能なモジュール枚数(アレイ容量)は強く制約される。

また、接触時間  $T$  を短くするほど  $P_M$  は大きくなる。つまり「ヒトの応答は早い(早く手を離す)」と仮定すれば人体通過電荷量は少なく済むので、より多くのストリングの並列が可能となるが、逆に「ヒトの応答は遅い(手を離すのが遅れる)」という前提で設計する場合には、並列可能なストリング数は強い制約を受ける。

この図の Panasonic モジュールと Toshiba モジュールを比較すると、同等なストリング電圧 ( $V_{oc}$ ) でも Toshiba モジュールの最大許容アレイ容量が小さい。具体的には、例えば  $T = 3$

でストリング電圧が 1000V 程度の場合、Panasonic モジュールの最大で 74 ストリングの並列、アレイ容量にして 352kW が許容されるが、Toshiba モジュールのそれは 180kW である。この理由の一つは Fig.8 にあるように Toshiba モジュールの方が減衰項の静電容量成分が大きいためである。他の一つは Table1 からわかるように、どちらのモジュールも定格最大出力  $P_{MAX}$  に大差はないが、Panasonic モジュールは開放電圧  $V_{oc}$  が大きいからである。つまり Panasonic モジュールはより少ない直列枚数で高いストリング電圧を得ることができるため、Toshiba モジュールよりも直列枚数の二乗の影響を受けにくい。

## 5. 結言

筆者は、太陽光発電設備の直流部分におけるヒトの感電リスクの工学的な議論の基礎とするため、『太陽電池モジュール/ストリングー大地』間がどのような等価回路で説明できるか」という命題に取り組んできた。

ここまでの取り組みの結果、測定に用いた 3 種類の結晶 Si 系太陽電池モジュールとも、300 秒という観測時間の範囲内では減衰周波数の異なる七つの RC 直列回路(第 1 減衰項~第 7 減衰項)の並列構成で説明でき、異なる太陽電池モジュールでも各減衰項の回路素子の値に大きな違いがないこともわかった。

最も減衰の速い第 1 減衰項はその周波数が数百 kHz にもなりかつ抵抗成分が極端に小さいことから、この減衰項は実質的には静電容量項とみなせるだろう。第 2 減衰項以降は減衰周波数が小さくなるとともに抵抗成分が大きくなる。最も減衰の遅い第 7 減衰項は、その周波数が  $10^{-3}\text{Hz}$  のオーダーであるから、ほぼ抵抗のように振る舞う。ただし、もし観測時間をより長くとしたとすれば、さらに減衰の遅い 8 番目の減衰項が現れる可能性は十分にある。

容量絶対湿度との関係に関しては、減衰周波数が小さい(減衰が遅い)項ほど容量絶対湿度の影響を受けることがわかった。具体的には抵抗成分は負の相関を、静電容量は正の相関を示した。ただし、両者の積の関数である減衰周波数ほどの減衰項においても容積絶対湿度に鈍感であった。

興味深いのは、ガラスが割れたモジュールを含むストリングの挙動と降雨下での挙動である。どちらの場合も抵抗成分や静電容量成分は大きく変化するが、その変化は同一減衰周波数上から大きくは逸脱しない範囲内で起きている。ただしこれは一つの例にすぎず、あらゆるガラス割れモジュールがこのような挙動を示すとは限らないことにも留意が必要である。

このように太陽電池モジュール/ストリングの対地回路が過渡現象をとまらぬ RC 回路で構成されるならば、それはもう「対地絶縁抵抗」ではなくむしろ「対地(絶縁)インピーダンス」と呼ぶ方が適切であろう。

なお、この等価回路仮説とそれにもとづく解釈が、太陽電池種類や材料・構造が異なる他のモジュールにも適用できるか否かについては、現時点では不明である。また、この仮説は実際に起きている現象を等価回路理論で説明しているの

り、現実に太陽電池モジュールと大地の間に七つの漏れ電流経路が存在することを主張するものではない。

現実の太陽光発電設備における「対地インピーダンス」の測定では60秒経過値を絶縁性能の判断根拠とするのが一般的であるが、上記仮説にもとづけば、これは最も抵抗成分が大きくかつ最も減衰の遅い第7減衰項の抵抗成分に対応する。このことに具体的にどのような意味があるだろうか。少なくとも瞬間的な事象であるヒトの感電リスクを論じる指標には適さないことは明らかである。

第2報でも述べたように、提唱している仮説は太陽電池モジュール／ストリングと大地の間には、両者を接続してからほんのわずかの時間に減衰するいくつかのRC直列回路があることを説明している。ヒトの感電を理論的かつ定量的に議論するにはこれら高速回路に注目する必要がある。本稿では、最悪の状況、具体的には降雨下において非接地アレイの電位差が最大となる「ストリング端—大地」間を「濡れたヒト」が接続した状況を想定した高速回路の回路素子値を用いて、「感電時の人体通過電荷量に上限を設ける」という考え方にもとづくアレイの電気安全設計方法を提案しその試算例を示した。これによればモジュールの直列枚数は人体通過量に二乗で作用する。すなわち、ストリング電圧を高くすることは、一方で経済性の向上に寄与するが他方では感電リスクを高めることになる。

なお、この試算例は安全率を考慮していない。また、試算に用いた回路素子の各値が降雨下における最悪の値である保証もない。したがって、仮にこの方法を具体化するのであれば、回路素子の最悪値の適正な取得方法を定める必要がある。また、安全率やヒトの最大接触時間の設定値を合理的に決定する必要もある。

最後に、これら一連の研究が今後の太陽光発電設備の電気安全リスクに関する議論の活性化の一助となれば幸いである。

## 謝辞

この成果の一部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たものである。

## 参考文献

- 1) Kazuhiko Kato, A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground, Journal of Japan Solar Energy Society, 49(2), 55-63 (2023) (DOI: [https://doi.org/10.24632/jses.49.2\\_55](https://doi.org/10.24632/jses.49.2_55))
- 2) Kazuhiko Kato, A Proposal for Equivalent Circuit Between PV Module/String and the Ground (2) - An improvement on high-frequency components and data analysis under the outdoor condition-, Journal of Japan Solar Energy Society, 50(2), 67-73 (2024) (DOI: [https://doi.org/10.24632/jses.50.2\\_67](https://doi.org/10.24632/jses.50.2_67))
- 3) Y.Takeda, T.Hashimoto, K.Sakamoto, H.Wakiya, Earthing connections of electrical machines and apparatus on non-grounding power system, Journal of the M.E.S.J, 13(10), 786-791 (1978)
- 4) 厚生労働省, 職場の安全サイト～安全衛生キーワード「感電」 (accessed Nov. 26 2024), [https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo74\\_1.html](https://anzeninfo.mhlw.go.jp/yougo/yougo74_1.html)
- 5) 中央労働災害防止協会, 低圧電気取扱者安全必携—特別教育用テキスト—, 24(2021), 東京