特　集

太陽光発電設備の保守・保安点検に用いる
各種測定機器の技術解説

ＰＶドクターシリーズの技術解説

Technical Guide of “PV Doctor” Series

片渕　健*

1．はじめに

太陽光発電システムの電気的特性を健全に維持するための装置として，「太陽電池モジュールおよびストリングの電流－電圧特性測定装置」および「太陽光発電設備の保安点検装置」がある．本稿では，電流－電圧特性測定装置を用いた「異常検知」と，保安点検装置を用いた「故障箇所特定」について，技術的側面から解説する．

2．電流－電圧特性測定器（ストリングトレーサ）の技術解説

当社の太陽光発電システム点検装置（PV ドクター）の製品構成は非常にシンプルで，まず電流－電圧特性測定器（以下ストリングトレーサ）でストリングの出力特性を測定する．この段階で「異常を検知」した場合は，故障箇所特定装置（以下セルラインチェッカ）にて「異常箇所を特定」する最小限の構成となっている．

太陽電池は日射強度変化に追従して発電能力が刻々と変化する．このような環境でストリングの出力特性を精度良く測定するために，ストリングトレーサは「日射強度変化の影響を受けない」ことをコンセプトとした製品である．

2.1　コンセプトを実現するための技術アプローチ

（1）I-V 測定方式

「屋外での太陽電池アレイ出力特性測定方法」は JIS C 8953 に規定されており，測定用負荷電流を流す方法としては，コンデンサ負荷方式と電子負荷方式が主流である．コンデンサ負荷方式は一般的に測定時間を一定にすることが困難で，システム電圧や日射強度により測定時間が変化する．また，再測定には放電が伴うため，繰り返し測定インターバルも長くなり，かつ，充放電によるコンデンサの寿命も考慮する必要がある．ストリングトレーサは，「日射強度変化の影響を受けない」というコンセプトを実現するために，太陽電池のエネルギーを消費する装置として半導体素子を用いた電子負荷方式を採用した．

（2）多チャンネル化による同時測定相対比較

従来の電流－電圧特性測定器は 1 回路構成が一般的で，刻々と変化する日射強度の影響を受けないように高速測定を行っても，測定結果の良否を判断するためには，基準状態への変換（以下 STC 変換）が必須となる．この変換には，モジュールの特性を示す係数の他に，モジュール温度と日射強度データが必要であることから，温度センサと日射計を接続し，電流－電圧特性（以下 I-V 特性）測定と同期を取る必要がある．しかしながら，屋根上設置の太陽光発電システム等では，温度や日射強度を測定するには屋根に上る必要があり，容易なことではない．

このようにストリング出力の良否判断を行うためには，STC 変換後の特性で判断を行うことが必要となるが，ストリングの健全性を確認する目的の場合は，必ずしも STC 変換後の I-V 特性で判断する必要はなく，複数のストリングの I-V 特性を同時に測定し，波形を同時表示して相対比較を行うことで容易に異常判定が可能となる．ストリングトレーサは，電子負荷方式の利点である制御の容易性や小型化のメリットを生かして，2 ストリング（2CH）または 4 ストリング（4CH）同時に測定する仕様となっている．（図 1）（写真 1）

同時測定相対比較の条件としては，太陽電池モジュールの設置条件がそろっていることや，少なくとも 1 ストリングは正常な状態であることが条件と

* 株式会社戸上電機製作所 技術本部 研究開発部

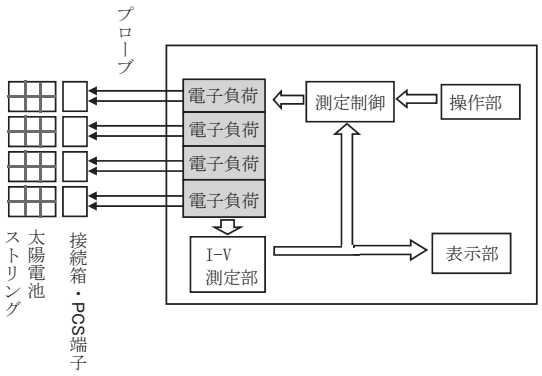

図１　同時測定方式装置構成

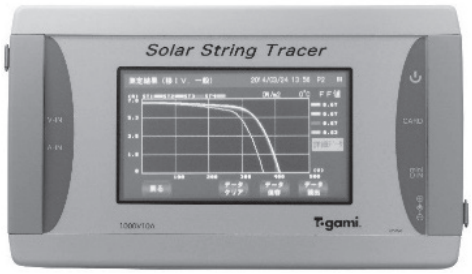

写真１　ストリングトレーサ

なるが，条件を満たさない場合は従来通りの方法で測定を行いSTC変換後判断することもできるため，運用上の問題はない．同時測定相対比較のメリットとしては，下記に示す内容がある．

①同時測定相対比較方式のため，測定時間違いによる日射変動の影響を受けない．

②日射変動の影響を受けないためSTC変換が不要で，日射計や太陽電池モジュール温度測定が不要である．

③同一画面に４ストリングの測定結果グラフを表示するために，視覚的に異常の検知ができる．

2.2　点検作業性を考慮したI-V特性測定への技術アプローチ

メガソーラー等の大規模発電設備の点検は，点検時間がコストに影響を与えることから，短時間での測定が要望されている．

2.1（2）項の同時測定の場合，多連プローブを使用すれば作業性は損なわれないが，未使用の場合は，プローブ接続に多少の時間を要する．この問題を解決するために，「同時測定方法」以外に1CHのみを使用し，ストリングを移動しながら測定を行い，結果を重ね書きする「移動測定方法」を取り入れた．

この方法は，日射強度が比較的安定している場合に有効で，順次ストリング出力に測定プローブを当てて測定を行うが，電子負荷方式による高速測定との相乗効果により測定作業効率がアップする．

2.3　点検による発電停止損失を最小現に抑えたI-V特性測定への技術アプローチ（特許取得済み）

一般的なI-V特性の測定方法は，ストリングを開放して行うが，この場合，一時的ではあるものの発電停止損失が発生する．この課題を解決するためのアプローチとして，連系状態のままでI-V特性を測定する「連系測定方法」を取り入れた．この方法は，ストリング毎にブロッキングダイオードが設けられたシステムが対象となるが，図２のようにPmax点からIsc側に測定を行うことにより，発電量に最も影響を与えるサブストリング故障（＝クラスタ故障）等の発見が可能である．連系状態のパワーコンディショナ（以下PCS）は，MPPT制御により，変化する日射量に対応して最大電力を引き出すよう運転を行っているが，「連系測定方法」はこのMPPT点で出力を行っている太陽電池に対し，PCSが電圧低下を検出しても停止しない限界電圧領域までの電流，または，PCSの電圧低下検出時間以内に短絡電流（Isc）までの電流をストリングトレーサ内で消費する形でI-V特性を測定し，ストリング異常を検知するものである．

「連系測定方法」時の接続としては，図３に示すように，ブロッキングダイオードのアノード側にストリングトレーサを並列に接続して測定する．この「連系測定方法」は，当社の配線路探査器シリーズ商品の共通コンセプトである「無停電での点検」という設計思想と共通するものである．

図４は連系状態で測定した多結晶太陽電池モジュール６直列の正常ストリングI-V特性，図５はその中の１枚のモジュールのセル数枚を遮光したストリングのI-V特性である．「連系測定方法」でも相対比較により，異常ストリングを検知できること

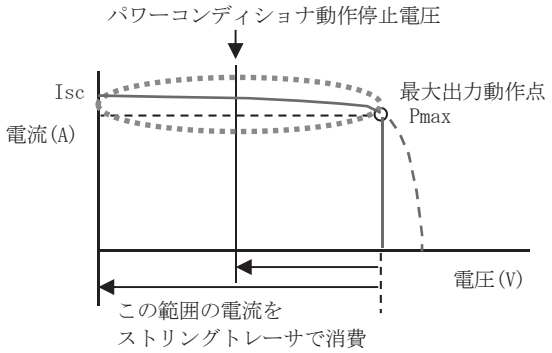

図２　連系I-V特性測定の考え方

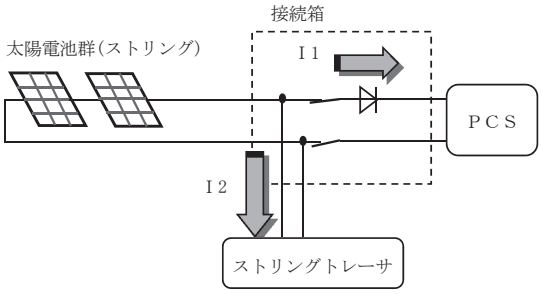

図３　連系 I-V 特性測定時の接続

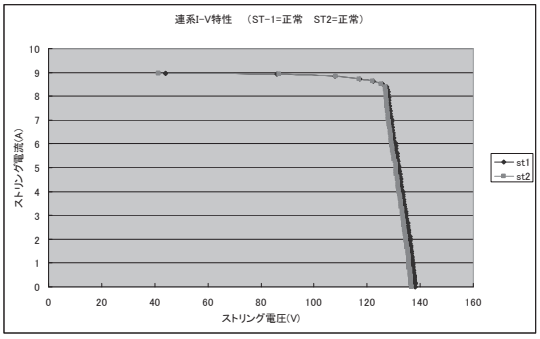

図４　正常ストリングの連系 I-V カーブ

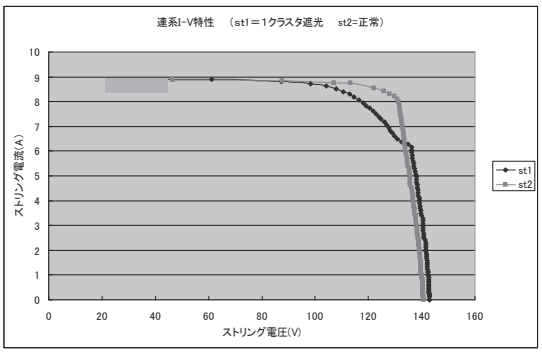

図５　正常ストリングで異常ストリングの連系 I-V カーブ

がわかる.「連系測定方法」の場合, 開放電圧（Voc）を起点とした特性カーブではないため，極性因子 FF（Fill Factor）での判定はできないが，連系測定方法により「他とは違うストリングを検知」できれば，第二段階として，故障ストリングのみを停止し，従来と同じ開放状態での I-V 特性測定を行うことができる.

2.4　I-V 特性測定以外の故障判断技術アプローチ

（1）ストリング開放電圧測定（電圧テスタ）

ストリングトレーサは I-V 特性測定時に電圧を測定することから，この回路を利用して開放電圧 Voc を測定表示する．単純な機能であるが，ストリング点検の第一段階である Voc 測定により，ストリング断線等の重大故障を検知できる.

（2）陰の影響調査

太陽電池モジュールに陰がかかった状態は I-V 特性の形状からでも判断できる．しかしながら，ホットスポットの要因となる陰は時間によって変化するため，晴天時に１日を通して観測を行わないと発見が難しい．特に目視に頼らず無人で調査を実施する場合には，雲の影響と陰の影響を区別する必要がある．ストリングトレーサは，この課題を解決するために，ストリング動作電圧と動作電流を連続的に記録するトレンド測定機能を設けた.

写真２は実際のトレンド波形である．I-V 特性のような瞬時的な特性ではなく，長時間測定を行って状態をグラフ化し，比較判断するものである．１日の測定では雲の影響と陰の影響を判別できないため，連続最大７日間 4CH（2CH）同時に測定し，毎日同じ時間帯に出力が低下するか否かで陰の影響の有無を判断する.

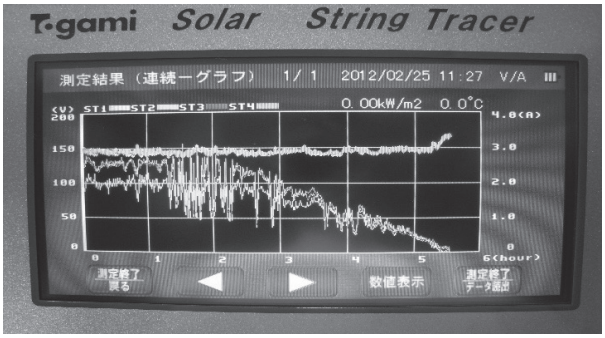

写真２　ストリング電流／電圧の連続測定結果

定期的に陰がかかるストリングについては，より精密なモジュール表面の状態観察や, 後で述べる「セルラインチェッカ」でのバイパス回路のチェックが必要である.

3．故障箇所特定装置（セルラインチェッカ）の技術解説（特許取得済み）

２項では，ストリングの電流―電圧測定器について記載したが, 異常を検知した後は次の段階として，どこに異常があるかを特定する「故障箇所特定」作業が必要となる.

運用開始後の故障の原因を見てみると，施工段階に起因していることも多い.

このようなことから，写真３のセルラインチェッカは「施工段階・運用段階の両方で利用できる」また，点検可能日数を広げるために，晴天以外でも点検ができるように「曇り日でも点検できる」ことをコンセプトとした製品である.

写真３　セルラインチェッカ

3.1　コンセプトを実現するための技術アプローチ

（1）信号電流による故障箇所特定原理

故障箇所を特定する方法としてはいくつかの方法が考えられるが，故障箇所特定段階において，太陽電池にストレスを与えないことが最大のポイントであり，点検効率面からは天候の影響を受けないことが重要な要素となる.「信号電流による故障箇所特定方法」の場合，送信器接続は図６の形で点検ストリング出力端子間に接続する．送信器は電流消費型送信器のため，太陽電池が電圧源となって信号電流が流れる. 信号電流は微少な定電流としているため，天候に関係なく曇り日でも信号電流を流すことができ，また，連系前の施工段階でも使用できる.

受信器は信号磁界を検出するためのセンサを内蔵しており，太陽電池モジュール面に受信器を接触させて受信器の反応を確認する．結晶シリコン系モジュールの場合, ストリング構成は直列接続のため，送信器を接続したストリングのすべてのモジュールに同じ信号電流が流れることになる.

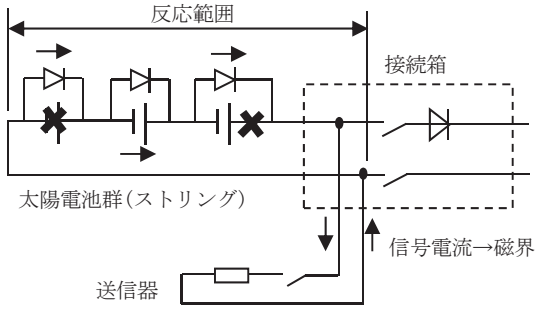

図６　信号電流による点検原理

（2）信号電圧による故障箇所特定原理

ストリング内のコネクタ接触不良やケーブル断線等の場合，回路が切れることから信号電流を流すことができない．この場合，故障箇所を検出する手段としては，信号電圧印加による「電界検出方式」がある.

送信器接続は図７の形で点検ストリングと対地間に信号電圧を印加する．受信器は信号電界を検出するためのセンサを内蔵しているため，太陽電池モジュール間電線や接続コネクタに受信器を接触させて受信器の反応を確認する．信号電界は，接続されている導体すべてに発生するため，モジュール表面に受信器を当てて反応の有無を確認し，反応点と未反応点の境界が見つかったらその付近を重点的に点検する.

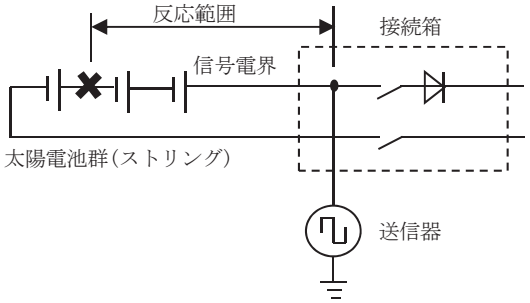

図７　信号電圧による点検原理

3.2　作業性を考慮した故障箇所特定への技術アプローチ

（1）ストリングの太陽電池モジュール配置特定

点検時の各ストリング構成太陽電池モジュールの配置特定作業は，故障箇所特定時間短縮のためには欠かせない作業である.

図６に示すように，接続箱のストリング出力端子間に送信器を接続し各モジュール面を点検すると，送信器を接続したストリングのすべてのモジュールで受信器が反応する.

モジュールを外して裏面配線を確認することなく, 簡単に該当モジュールを見つけることができる.

（2）太陽電池モジュール内の故障箇所特定

a．発電停止サブストリング（＝クラスタ）特定

太陽電池モジュール内の故障は図８に示すような故障が考えられ，出力低下のみならず，断線が起点となる異常発熱の故障要因となる．この中でバスバー断線，インターコネクタ断線，セル割れ等の故障箇所特定は，図６のように送信器を接続して信号電流を流し，受信器でモジュール表面を点検することにより検知できる.

サブストリングの異常検知が主体となるため，短時間で信頼性の高い点検が可能である.

図９は実際の点検状態を示した図である.

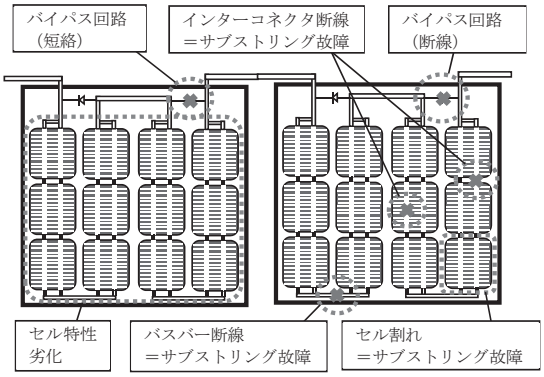

図 8　太陽電池モジュール内故障箇所

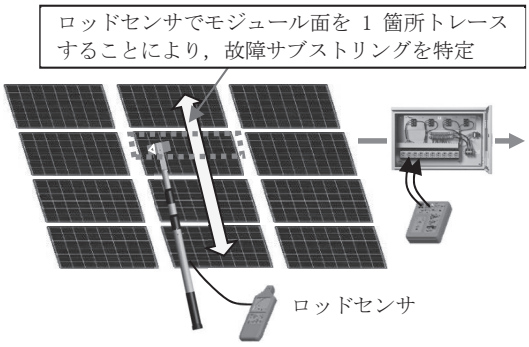

図 9

b. ホットスポット発生箇所特定

太陽電池モジュールの故障モードの一つであるセルの部分異常発熱（以下 ホットスポット）の有無点検は，サーモグラフィー等を用いれば発熱温度および発熱場所を視覚的に確認できるために広く用いられている．また近年は，ドローンの普及により広範囲を短時間で点検する手法も開発され，メンテナンスコストの低減に寄与している．しかしながら，サーモグラフィーの場合，発熱していることが前提となるため，点検できるのは晴天時であることが条件となる．

ホットスポット発生モジュールを特定した後はどの時点で交換を行うかの判断が重要となる．交換を行う判断材料としては，太陽電池モジュールメーカーへ技術的な見解を求める場合もあり，発熱温度データのみでは不十分な場合もある．「セルラインチェッカ」は，セル内の電気的故障検知が可能であり，断線故障を物理的に証明することができる．

図 10 は故障セルの点検方法で，図 9 と同様に送信器を接続箱に接続し，（サーモグラフィーを用い特定したホットスポット発生部分の）インターコネクタ部を受信器でトレースする．

セルが正常な場合，各インターコネクタの信号電流はほぼ均等であり，各インターコネクタ毎の受信

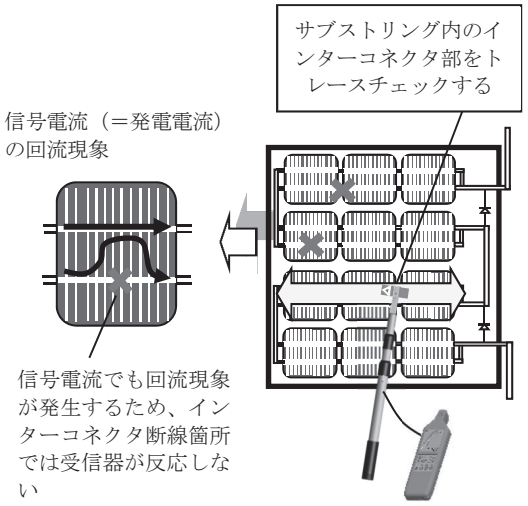

図 10　故障セルの点検方法

器反応も大差はない．一方，セル内で一部のインターコネクタが断線していた場合は，受信器の反応は断線部では未反応となり，対向する他のインターコネクタ部の反応は大きくなることから，容易に断線箇所を特定することができる．この段階の状態を放置すると，ホットスポットの拡大や高温発熱によって周辺部材へ影響を及ぼすことになるため，モジュールの交換対応が必要となる．

インターコネクタの断線箇所は未発電領域となる場合が多く，図 11 のように EL 画像で見た場合の未発電セル状態とも一致する．

前述の通り送信器は定電流負荷装置として作用するため，天候に関係なく曇り日でもモジュール内の信号電流の流れは一定である．受信器は信号電流レ

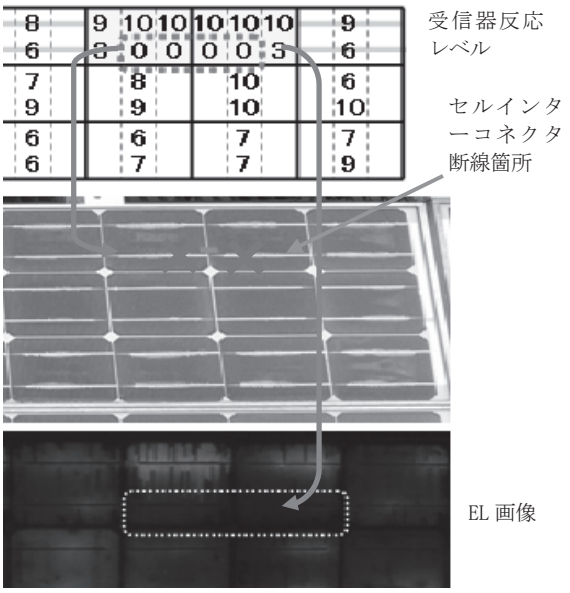

図 11　EL 画像と受信器反応対比

ベルを受信レベルに置き換えて表示するため，受信レベルの絶対値比較が可能である．

高価なEL装置を用いなくてもモジュール内電気回路の状態を視覚的に確認できるメリットがある．

c．バイパス回路の健全性調査

バイパスダイオードを含むバイパス回路の断線は，安全性側面において最も影響が大きい故障モードである．この部分の故障は，陰が掛からない限り発見しにくい故障のため検知手段も限られる．

図12は太陽電池モジュールに陰かかかった場合のストリング内の発電電流の流れを示す図で，バイパス回路が健全な場合，発電量は低下するもののモジュール内のセルは保護される．バイパス回路が断線しているモジュールは，未発電部分のセルにも電流が流れることから，陰の部分のセルは発熱する．樹木や屋根の陰のように毎日繰り返し陰がかかるような設置環境では，長期使用による熱ストレスによりバイパス回路が故障に至り，モジュールの設置環境によっては，周辺部材へ影響を及ぼし最悪火災等へ移行することも懸念される．

図13は具体的な点検方法を示した図である．

この方法は，2009年の太陽エネルギー学会誌Vol.35の中で紹介されたもので，サブストリングのセルの一部を遮光シートで遮光し模擬の陰を作る．この状態で，遮光シートで覆ったサブストリングのインターコネクタ部分に受信器をあてると，バイパス回路が健全なサブストリングは「未反応」，故障しているサブストリングでは「反応」することから，容易に故障を検知できる．

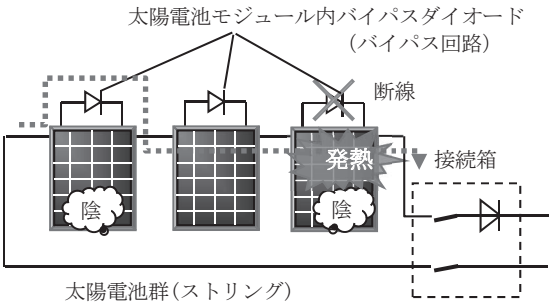

図12　陰がある場合のストリング電流の流れ

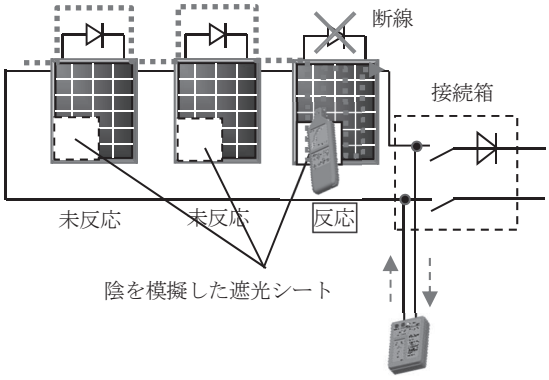

図13　バイパス回路健全性の点検方法

PCSの代わりに，負荷装置となる送信器を接続し，模擬的に陰を作るだけのため，実際の陰と等価な電気的環境となり，モジュールに対するストレスを考慮する必要がない．

（3）太陽電池モジュール外の故障箇所特定

a．不良コネクタ・ケーブル断線箇所の特定

コネクタ接触不良やケーブル断線箇所特定は，図7の形で点検ストリングと対地間に送信器を接続し信号電圧を印加する．写真4はストリングの点検状況を示す図で，太陽電池モジュール表面，またはバックシート面を受信器で点検し，反応する範囲（信号電界がかかっている範囲）と未反応の境界を探して，断線箇所の切り分けを行う．その後，モジュール裏面のコネクタ部電線に受信器を近づけて点検を進め，コネクタ両側の電線の点検結果が「反応有」と「反応無」となる部分が断線箇所となる．

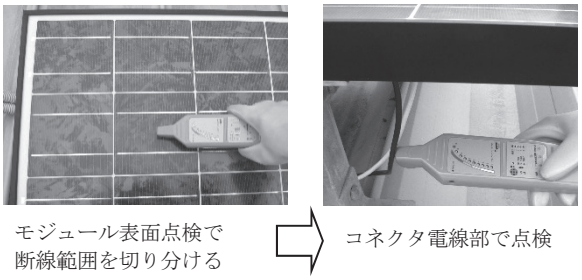

写真4　ストリングにおける断線箇所特定方法

図15は直・並列ストリングにおける断線箇所点検方法を示したもので，電界信号は接続されたすべての直･並列モジュールおよび接続電線（電気回路）に印加されるため，直列ストリングとは異なった点検手順が必要となる．

第一段階でストリングブレーカを「切」にし，送信器を図15（1）のようにストリング出力＋－端子間に接続して信号電流を流し，「磁界モード」で断線並列回路を特定する．

断線回路が確定したら第二段階として図15（2）のように送信器をストリング出力端子と対地間に接続し，断線回路の並列コネクタを外した後，「電界モード」で再度故障回路のモジュール表面およびコネクタ電線を点検し断線箇所を特定する．

以上の方法で並列回路の故障も検知が可能である．

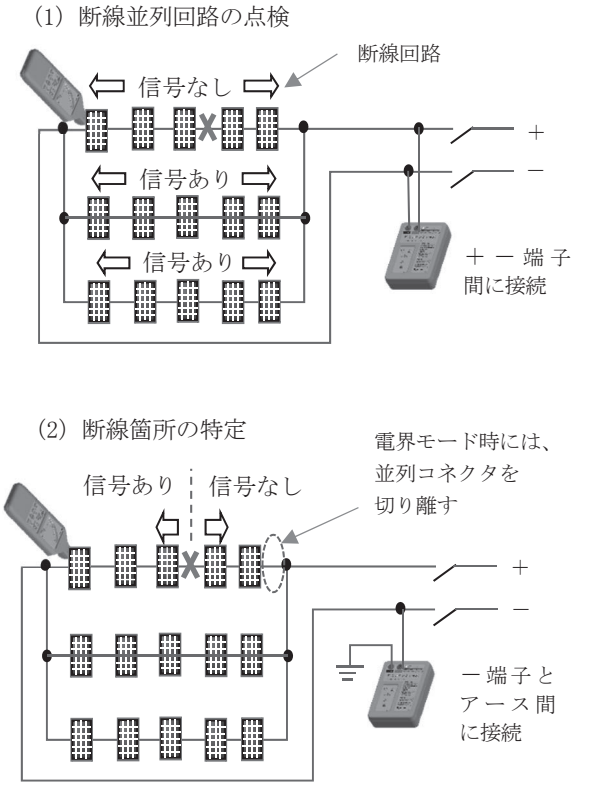

図 15　直・平列接続ストリングにおける不良コネクタ・断線箇所特定方法

著者略歴

片渕　健（カタフチ　タケシ）
（株）戸上電機製作所　技術本部 研究開発部 R & DG 上席研究員，佐賀県再エネコーディネーター