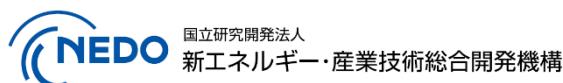


壁面設置太陽光発電システム 発電電力量推定方法に関するガイドライン ～入射角依存性を考慮した推定方法～

この成果物は、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「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発（壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定）」の結果として得られたものです。

2025年3月31日



国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構



はじめに

壁面設置太陽光発電システム(以下、壁面 PV)の場合、垂直設置となるため、一般的な地上設置(傾斜角度 10~40 度程度)と比較すると、日射量が強い時間帯において、大きな入射角で入射する頻度が多くなる。太陽電池モジュールは一般的には入射角が大きくなるほど標準試験状態の入射角度 0 度と比較して、発電特性が低下する。また、建物の壁面設置となるため、周囲環境に建物が存在することが想定されるため、日影の影響を考慮することも重要となる。

そのため、壁面 PV の発電電力量推定においては、地上設置の時と比較して、入射角度、日影の影響を十分に考慮した推定方法が必要となる。日影に関しては、地上設置においても考慮している例もあるため、本ガイドラインは、入射角度による影響(入射角依存性)を中心に発電電力量推定における注意点についてまとめる。本ガイドラインは壁面 PV を導入計画する際の基本設計時に利用することを想定しているため、基本設計時に発電性能を検討する設計者および入射角特性に優位性を持つ太陽電池を開発するメーカーを主な読者として想定する。

「第 1 章 発電電力量推定モデル」では、発電電力量推定モデルの基本的な構成、要素として重要となる気象データ、日射量の変換モデル、発電特性の概説を述べ、代表的な推定ツールの紹介を行う。「第 2 章 入射角特性の考慮方法」では、本ガイドラインにて特に考慮すべき要素として取り上げる入射角特性の推定モデルについて解説し、補正係数の例を紹介する。「第 3 章 実証データを利用した検証結果例」では、入射角特性が異なる太陽電池を用いた実証データを利用した計算例を紹介する。

最後になりましたが、本ガイドラインの作成にあたり、「NEDO委託事業 垂直設置 PV 基盤技術検討委員会 設計・施工ガイドライン策定分科会」の皆様をはじめ、経済産業省、NEDO事業に参加頂いている企業や研究機関など、多くの方々のご支援ご協力を賜りました。この場をお借りして、厚くお礼を申し上げます。



写真 1-1 壁面設置 PV の事例 出典:産業技術総合研究所

「壁面設置太陽光発電システム」に関するガイドラインについて

「壁面設置太陽光発電システム」に関するガイドラインについて

2024 年度は「壁面設置太陽光発電システム」に関する以下のガイドラインが公開されているので、参考までに紹介する。

・「壁面設置太陽光発電システム 設計・施工ガイドライン 2024 年度版」(2025 年 3 月公開、<https://www.pvtec.or.jp/deliverables/view/425>、作成:太陽光発電技術研究組合、発行元:太陽光発電技術研究組合)

建築物の外壁と外壁に付随する部分や屋根等の建築外皮に適用する BIPV モジュールおよびシステムに関して、建築分野と電気分野の双方から、お互いの分野にアプローチしやすいように、包括的に必要と考えられる項目に焦点を当て纏めている。

・「壁面設置太陽光発電システム 日射熱取得率(高精度)評価に関する技術文書」(2025 年 3 月公開、<https://www.pvtec.or.jp/deliverables/view/427>、作成:太陽光発電技術研究組合、産業技術総合研究所、発行元:太陽光発電技術研究組合)

壁面設置太陽電池モジュールの日射熱取得率評価技術の各国の現状、および、日本国内で開発した日射熱取得率高精度評価技術について解説している。

・「建物設置型太陽光発電システムの設計・施工ガイドライン 2024 年版」(2024 年 8 月公開、<https://www.nedo.go.jp/content/100981448.pdf>)、作成:産業技術総合研究所、構造耐力評価機構、太陽光発電協会、大成建設、大阪公立大学、発行元:新エネルギー・産業技術総合開発機構)

建物の屋根や壁面への設置に関する具体的な設計・施工方法をまとめており、主に構造耐力の安全性(風荷重、積雪荷重、地震耐性、など)と電気的安全性(電気配線、接続方法、など)について詳述している。

目 次

1. 発電電力量の推定モデル	2
1.1 気象データ	3
1.2 水平面日射量から傾斜面日射量への変換	4
1.3 発電特性	5
1.4 代表的な発電電力量推定ツール	7
2. 入射角特性の考慮方法	8
2.1 入射角特性の推定モデル	8
2.2 屋内実験データの活用例	10
2.3 入射角特性を考慮可能な発電電力量推定ツール	13
2.4 入射角特性補正係数の例	13
3. 実証データを利用した検証結果例	16
4. まとめ	20
索引	21

1. 発電電力量の推定モデル

発電電力量の推定モデルは、入力となる日射量から算出される標準出力電力量(標準試験状態の測定した定期容量に日射量乗じた値)とシステム出力電力量までの間に各発電特性に影響する物理特性が存在する。それぞれの過程を物理モデルで表現する方法、簡易モデルとして固定のパラメータとして表現する方法がある。物理モデルで表現する方法では、それぞれの特性が一般化され、詳細な損失や発電特性を模擬可能なため、太陽電池の種類やシステムの違いを正確に表したい場合に有効である。他方で、物理モデルを用いるには、それぞれの物理モデルに必要な情報や各種パラメータが必要となる。

物理モデルでの表現が困難な場合、物理モデルに利用するパラメータが存在しない場合、または詳細化する必要がない場合(例えば、太陽電池、システム種類によるばらつきが小さいもの)については、統計的な簡易モデルにより表現される。

簡易モデルの考え方の一つとして、パラメータ分析法がある。各損失過程の前後での入出力のエネルギー比を補正係数として表現する方法である。基本的には、エネルギーフローの順序にそって計算していくが、パラメータ分析法においては、補正係数の積で表すため、順番を無視して表現する。JIS C 8907:2005 太陽光発電システムの発電電力量推定方法では、この考え方方が用いられている。

システムの発電特性分析などで利用されるシステム出力係数は、すべての補正係数の積と等しく、発電電力量推定では総合設計パラメータと等価となる。

このように発電電力量の推定モデルには、物理モデルと簡易モデルが存在するが、目的や対象とするシステムに応じて、影響が大きい発電特性、差異化したい発電特性がある場合、それぞれの補正係数について部分的に物理モデルを用いるなどにより詳細化して、両者を組合せたモデルを利用する。

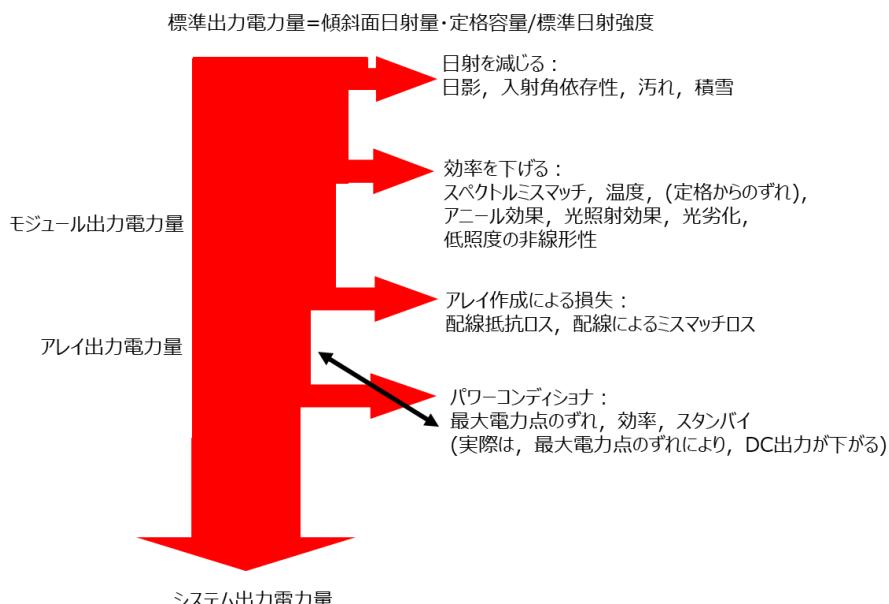


図 1-1 発電電力量の推定モデルにおけるエネルギーフロー

1.1 気象データ

PV システムの発電電力量の推定に必要な主要な気象データとして、日射量、気温、風速がある。日射量は入力エネルギーのベースになり、気温、風力は太陽電池セル・モジュールの温度特性の推定に利用する。

利用可能な気象情報のデータベースとしては、以下のようなものがある。

(1) 気象庁データ

国内において、気象庁の全国約 150 か所の気象台・測候所では、水平面全天日射量を約 60 か所で観測を行っており、データに関しては HP からダウンロード可能である。

また、アメダス (AMeDAS: Automated Meteorological Data Acquisition System) と略される地域気象観測システムでは、約 1,300 か所のうち 840 か所において降水量に加えて、風向・風速、気温、湿度、日照時間(推計値の提供)が測定されている。日照時間はそのまま利用できないため、日射量への推定が必要である。

参考文献: 気象庁 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>
気象庁 過去の気象データ・ダウンロード,
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obndl/index.php>

(2) METPV・MONSOLA

日本気象協会がNEDO委託研究の一環として、整備した気象データベースである。METPV(年間時別日射量データベース)では、毎時の気象データを収録されており、最新バージョン(METPV-20)では、統計期間 2010 年～2018 年の全国 1km メッシュのデータが収録されている。気象庁が日射量を観測している地点は約 50 力所のため、観測を行っていない地点は日本気象協会が開発した「日照時間等から全天日射量を推定するモデル」を用いて日射量を算出・推定した値となっている。また、MONSOLA(年間月別日射量データベース)では、各月(年間)の方位角別、傾斜角別の月(年)平均日積算日射量が収録されている。こちらも気象庁が日射量を観測している地点は約 50 力所のため、観測を行っていない地点は日本気象協会が開発した「日照時間等から全天日射量を推定するモデル」を用いて日照時間観測地点の日射量を算出・推定し、さらに「ひまわり 8 号データから推定した日射量分布」を用いることで、1km メッシュ毎の日射量を算出・推定している。

参考文献: NEDO 日射に関するデータベース, https://www.nedo.go.jp/library/ZZFF_100041.html

(3) 衛星推定日射

衛星推定日射は衛星観測データから推定した日射量として公開されているデータベースである。衛星観測データから推定するモデルはそれぞれ異なる。収録期間や商用利用などにより有償・無償の制限がある。

- NSRDB, National Solar Radiation Database: <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>
- 太陽放射コンソーシアム, <http://www.amaterass.org/>

- ・ JAXA ひまわり(閲覧のみ), https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/index_j.html

また、有料のデータベースとしては SOLASAT、Metronorm、SolarGIS などがある。

1.2 水平面日射量から傾斜面日射量への変換

公開されている気象データベースでは、水平面日射量のみを収録されていることが多い。この場合、アレイ面に沿った傾斜面日射量に変換する必要がある。傾斜面への変換は、水平面の直達成分と散乱成分の推定および、それらを傾斜面に変換し、合成するモデルが必要となる。

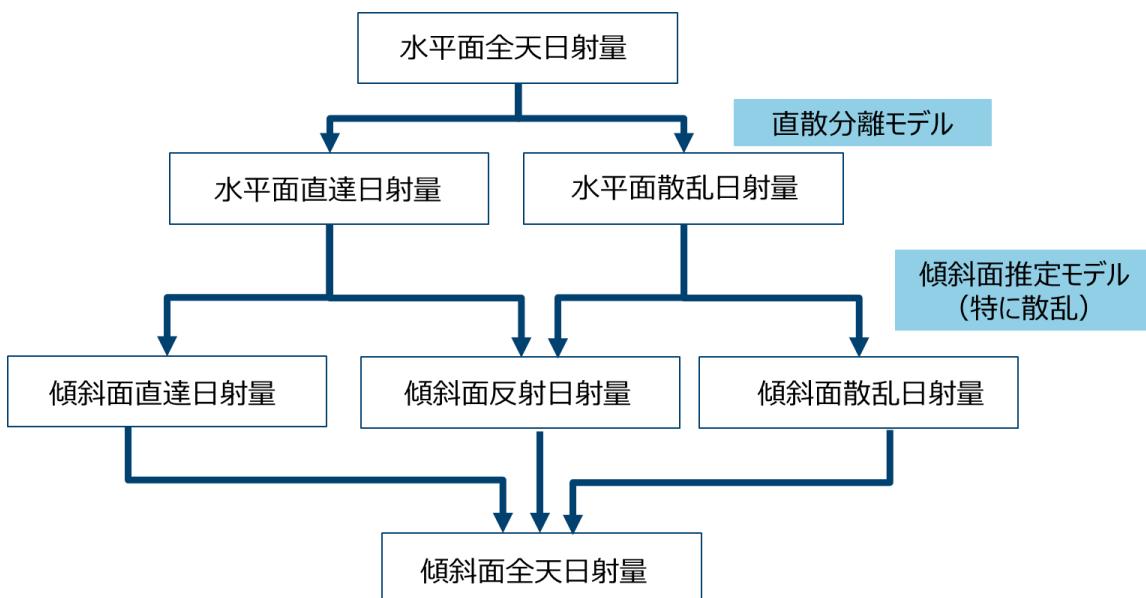


図 1-2 水平面日射量から傾斜面日射量への変換モデルの概要

(1) 直散分離モデル

水平面全天日射量から直達成分と散乱成分を推定するモデルを直散分離とよび、代表的なモデルとしては Erbs らによるモデルがある。Erbs モデルは、晴天指数の範囲により分類し、それぞれの範囲で晴天指数をパラメータとした散乱比を実験式により求められている。

参考文献:D.G. Erbs, et al., “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation”, Solar Energy, Volume 28, Issue 4, 1982, Pages 293–302

(2) 傾斜面直達日射成分

水平面直達日射量を用いて、傾斜面に入射する直達成分は単純なベクトルによる成分計算によるモデルである。なお、天頂角が大きい場合、除算値が小さく推定値が過剰になるため、86 度以下(太陽高度 4 度以上)などに推定モデルの適用を限定する必要がある。また、入射角に関しても±90 度以上では傾斜面に入射する直達成分はないと設定する必要がある。

(3) 傾斜面散乱成分(天空散乱成分)

傾斜面散乱成分の推定モデルの代表としては、Perez のモデルがある。他には、Hey モデルや均一モデルといったものがある。Perez モデルでは天空散乱日射を①全天空一様な強さの散乱光、②太陽周辺光、③地平線光の 3 成分で表現されている。

参考文献:Perez, et al., "A new simplified version of the PEREZ diffuse irradiance model for tilted surfaces", Solar Energy (1987)

(4) 傾斜面反射日射成分

地表面で反射して傾斜面に入射する成分である。水平面日射量を用いて、ベクトルによる成分計算および、反射度を表す地表面アルベドにより計算される。地表面の状況によりアルベドの値を設定する必要がある。

1.3 発電特性

発電特性のうち代表的な特性(損失やゲイン)を紹介する。

(1) 日射に関連する特性

太陽電池アレイ(モジュール)に入射する日射量が減少する特性である。代表的なものとして、周辺環境により太陽電池アレイに日陰がかかり、入射のエネルギーを減らす日陰損失がある。周辺の建物や樹木などにより定期的にかかる日陰、雲等により特定の時間にのみ発生するような部分陰がある。直達成分を遮る日陰を対象とするため、曇天日などは日射量自体が減ることから日陰損失とはならない。ここで日陰を考える場合、ベースとなる日射量データとの関係を整理しておく必要がある。実際のデータを利用する場合はポイントで測定する日射計のデータを利用することが多いため、ポイントの日射計が示す値から太陽電池アレイ全体の部分陰を含む値が損失に含まれる。そのため、日射計のみ日陰になり、太陽電池アレイ面に日陰が無い場合は、損失がゲインのように見えることもある。また、日射計とアレイの一部が同時に日陰になる場合には、データ上日陰損失が無いよう見えるが、実際はアレイ面の日陰損失が存在することに注意が必要である。発電電力量推定においては、データベースからの日射量を利用するため、アレイ面全体でひとつの値で表現することになる。そのため、アレイ面の日陰のモデルは、3D モデルなどにより周辺の建物や樹木などの定期的にかかる日陰を表現するモデルは存在するが、雲などの移動によるアレイ面内の部分陰まで表現するモデルは多くない。

日射量を減ずる特性として、日射の入射角によってモジュール表面のガラスによる反射や充填材の透過率の影響により、日射の入射する角度が垂直の状態(標準状態試験時)よりもセルに到達する日射量の減少による損失として、入射角特性による損失がある。標準試験時はガラス面での反射等を含む測定条件となるため、定格の値にその損失特性は含まれる。発電電力推定モデルでは、定格の値をベースとして考えるため、定格の条件からの差異をモデル化することになる。

入射角特性による損失は、同一日射条件において入射角が異なる影響を表現したものである。この特性は、直達成分のみでなく、散乱、反射成分の影響もある。

その他、太陽電池モジュールの汚れや劣化による性能低下による損失がある。汚れに関しては、アレイ面の傾斜角が浅い場合など、損失が多くなることがある。

また、アレイ面から見える天球の面積である天空率と散乱日射量との関係がある。周辺の建物等がある場合、アレイ面から見える天空率が減少する。散乱日射量は、基本的には天空の全方位から入力される日射量であるため、天空率が減少すると散乱日射量も減少する。発電電力量推定の入力として利用する日射量データベースでは、基本的には周辺の建物等が無い場合の日射量として考えるため、周辺の環境によりアレイ面からの天空率が減少する場合、天球率を加味した散乱日射量を減ずる損失量として考慮する必要がある。

都市部への設置の場合、周辺の建物等からの反射による日射量が増加する場合がある。この場合は、傾斜面日射量が増加するゲインとして考慮する必要がある。

(2) 太陽電池の物理的特性

太陽電池が物理的に持つ代表的な特性として、太陽電池セルの PN 接合部の温度上昇によるバンドギャップの縮小に伴う電圧の低下および電流の上昇特性がある。太陽電池セルのタイプにより若干異なるが、電圧低下が電流上昇より大きいため、最大電力は温度上昇とともに低下する。標準状態(25°C)の場合を損失 0 とするため、25°Cよりも高い温度では損失となり、低い場合はゲインとなる。

また、太陽電池モジュールの直列抵抗、並列抵抗、電圧特性などにより標準試験状態の 1kW/m² の条件と異なる日射条件により発電特性が異なる、低照度の非線形特性がある。直列抵抗、並列抵抗、電圧特性のバランスによって異なるため、低照度において発電特性が低下したり、場合によって上昇する。

その他、標準試験状態からの実環境との差異として、スペクトルミスマッチ、光劣化特性などがある。また、性能低下と同様な傾向として初期アレイ定格容量の誤差があり、表示よりも小さい場合は損失、表示より大きい場合はゲインとして表現される。

(3) アレイ構成における特性

アレイ構成における代表的な特性として、PV システムの直流回路における損失がある。主にストリングごとに直列に接続されるブロッキングダイオードによる電圧降下による損失および配線の抵抗による損失がある。また、構成する太陽電池モジュールのそれぞれの出力特性のばらつきがある場合、アレイの直並列によるそれぞれの IV カーブの合成によるミスマッチが発生し、単純なそれぞれの太陽電池モジュールの出力合計にならない。この影響は、アレイ構成による特性的一つとして、ミスマッチ損失となる。

(4) パワーコンディショナにおける特性

パワーコンディショナにおける特性として、MPPT 制御による損失がある。さまざまな条件の IV カーブ特性において、それぞれ最適動作点が存在する。標準試験状態での定格は最適動作点で

の出力のため、この点からの差異は損失となる。PV システムのパワーコンディショナには最大電力点(P_{max})追従制御(MPPT)機能が備わっている。MPPT の制御エラーはこの損失に含まれる。また、同様に需給バランスや系統電圧上昇による出力抑制制御、最低動作による定電圧制御、温度上昇による制御など、パワーコンディショナの制御により最大電力点からの差異が発生する場合、同様な損失となる。また、パワーコンディショナはパワーエレクトロニクスの回路により直流から交流に変換するため、その過程における変換損失がある。パワーコンディショナトポロジーにより負荷率に対する効率曲線がある。また、PV システムのパワーコンディショナは、それぞれ起動条件があり、傾斜面日射強度が 0 以上でも待機状態となる場合がある。その場合、入力エネルギーである日射量は存在するため、システム出力電力量が得られない場合は損失となる。

これら発電特性のうち、壁面 PV においては、地上設置型 PV と比較して、以下のような点が想定されるため、特に留意して発電電力量推定時に考慮する必要がある。本ガイドラインでは、特に入射角特性のモデル化について解説する。

表 1-1 壁面設置 PV を地上設置と比較した場合の代表的な特徴

日射に関連する特性	・都市部への設置が想定されるため、周辺の建物などの影響による日陰の影響が多くなる。また、天空率が相対的に小さくなるため、散乱日射量の減少が大きくなる。
太陽電池の物理的特性	・垂直面のため日射量の大きい時間帯における入射角度の大きい条件の頻度が高くなり、入射角特性の影響が大きくなる。同様に低照度の頻度も高くなるため、低照度特性の影響が大きくなる。
アレイ構成における特性	・日射に関する特性と関連して、部分的に日陰の発生があるため、アレイ内のミスマッチ損失が発生する可能性がある。
パワーコンディショナにおける特性	・アレイ構成における特性と関連して、アレイ内のミスマッチによる MPPT 制御が困難になる可能性がある。

1.4 代表的な発電電力量推定ツール

現在、PV システムの発電電力量を推定する市販や研究所から公開されているツール、ソフトウェアがある。それぞれ日射量データベースへの対応、各種損失過程のモデルや設定の自由度などが異なる。また、壁面 PV における周辺建物の影響による日陰の分析など必要な CAD や BIM (Building Information Modeling)との連携できるものなどがある。代表的なツールとしては、IEA PVPS TASK 15 のレポート「BIPV Design and Performance Modelling: Tools and Method (https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA-PVPS_15_R09_BIPV_Design_Tools_report.pdf)」にまとめられているため、参考にするとよい。このうち壁面 PV に必要な入射角特性を考慮可能なツールとしては PVSYST、SAM、PVlib があり、モデルは後述する ASHRAE モデル、Martin and Ruiz IAM Model モデル、Sandia モデル等が利用されている。

2. 入射角特性の考慮方法

基本的な考え方としては、入射角特性は太陽電池表面のガラス等による反射、太陽電池セル面までに到達する間の封止材などの屈折、反射、太陽電池セル面の反射防止膜などによる影響により、標準試験状態における入射角 0 度との違いにより表現される。また、入射角特性は日射量の直達成分と散乱成分、反射成分に関してそれぞれモデルがある。

2.1 入射角特性の推定モデル

入射角特性のモデルとして、直達成分に関するモデル、散乱成分に関するモデル、反射成分に関するモデルが存在する。

(1) 直達成分モデル

直達成分については、下記のような代表モデルがある。

- ・ASHRAE IAM モデル
 - ・Martin and Ruiz IAM モデル

太陽電池面日射量の入射角とその低減特性を表現するモデルである。入射角 0 度(太陽電池に垂直入射する場合。標準試験状態と同じ条件)を 1.0 として、そこからの低減する特性をモデル化している。

ASHRAE IAM モデルは最も単純なモデルであり、Souka と Safat(1966)によって開発され、後に米国の ASHRAE によって採用された。計算式を式 (2-1) に示す。このモデルはパラメータが b_0 の 1 つで済むという利点があるが、90 度において数値がゼロにならないため入射角の高い領域において表現できない条件が発生する問題がある。

$$\text{入射角特性} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \dots \dots \dots (2-1)$$

θ : 入射角度

b_0 : パラメータ

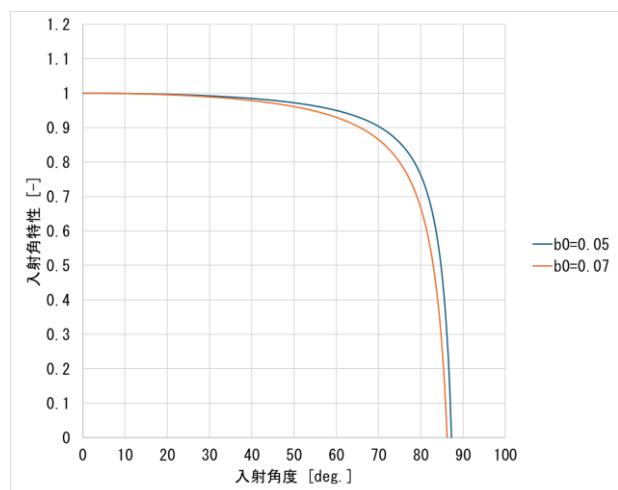


図 2-1 ASHRAE IAM モデルの例

参考文献: A.F. Souka, H.H. Safwat, "Determination of the optimum orientations for the double exposure flat-plate collector and its reflections", Solar Energy vol.10, pp. 170–174, 1966.

Martin and Ruiz IAM Model は、反射損失について説明しこれらの損失が年間エネルギーに与える影響をモデル化したものである。式(2-2)のように α_r のパラメータを調整し、屋外などで測定された実験データのフィッティングから決定される。

$$\text{入射角特性} = \frac{1 - \exp\left(\frac{-\cos(\theta)}{\alpha_r}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-1}{\alpha_r}\right)} \dots \dots (2-2)$$

θ : 入射角度

α_r : パラメータ

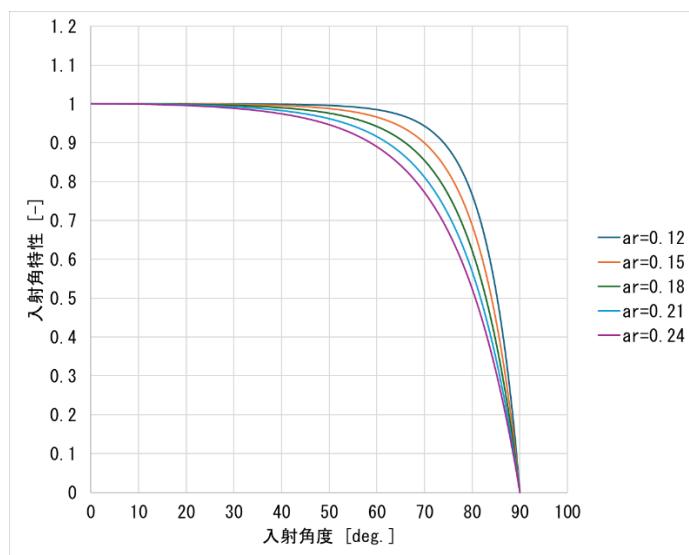


図 2-2 Martin and Ruiz モデルの例

参考文献: N. Martin, , J. M. Ruiz, "Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model", Solar Energy Materials & Solar Cells, 70, pp. 25–38.

(2) 散乱/反射成分モデル

散乱/反射成分モデルについては、M. J. BRANDEMUEHL らのモデルがある。散乱や反射日射は太陽電池面から見た天空分布、反射分布は均一で太陽電池モジュール面に到達することを想定した場合、様々な入射角からの日射が入射てくる。基本的な考え方としては、この様々な入射角度を考慮し、(1)で求めたような直達成分の反射特性を利用して、散乱日射および反射日射量を低減するモデルとなっている。具体的には、想定される入射角ごとの入射角特性を加重平均(積分)して計算する。このモデルでは、太陽電池アレイの傾斜角に依存して、太陽電池アレイ面から見える天空率や反射する地表面の面積や入射角度が異なるため、計算式は傾斜角度をパラメータとしたモデルとなっている。モデルとしては、散乱日射量および反射日射量について、傾斜

角ごとに加重平均(積分)した値が、直達成分の入射角特性に対応する、代表の入射角度(θ_d および θ_r)を求めるモデルとなっている。

散乱成分のモデル式: $\theta_d = 59.68 - 0.1388\beta + 0.0001497\beta^2 \cdots \text{式(2-3)}$

反射成分のモデル式: $\theta_r = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \cdots \text{式(2-4)}$

β : 傾斜角

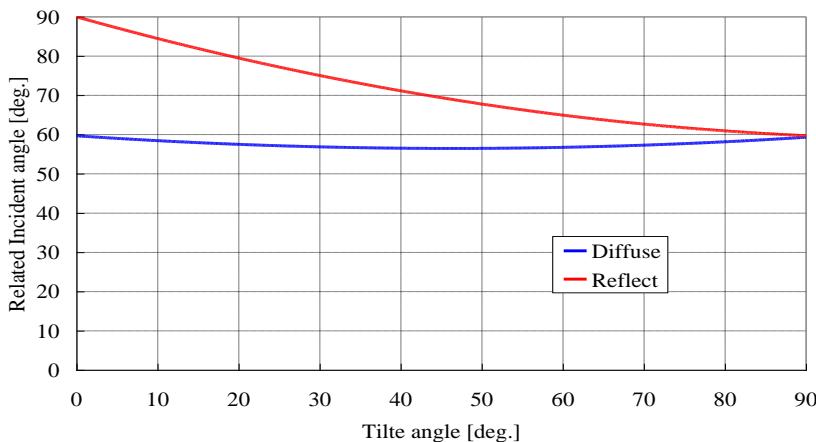


図 2-3 散乱/反射成分に関する入射角特性モデルの例

参考文献: M. J. BRANDEMUEHL and W. A. BECKMAN, "Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings", Solar Energy Vol. 24, pp. 511-513(1981)

2. 2 屋内実験データの活用例

屋内実験による入射角特性の測定方法の注意点とその事例について紹介する。屋内測定はソーラーシミュレータを利用した直達成分の入射角特性の測定になる。そのため、ソーラーシミュレータの広がり角を想定する必要があるため、拡散光を利用したソーラーシミュレータが利用できない。

入射角度を変更して測定する際には、短絡電流(I_{sc})の参照面が重要となる。回転軸は、測定する太陽電池モジュールの中心を軸とする必要がある。端部を回転軸とすると、到達する日射強度が変わってしまうため注意が必要である。また、入射角度によって太陽電池に到達する日射強度が異なるため、短絡電流の大きさにばらつきが発生する。そのため、電流の大きさに依存して、測定時の直列抵抗などの影響により特性が変わる可能性があるため、4 端子測定を必須とし、測定における接触抵抗などに十分に配慮して測定する必要がある。

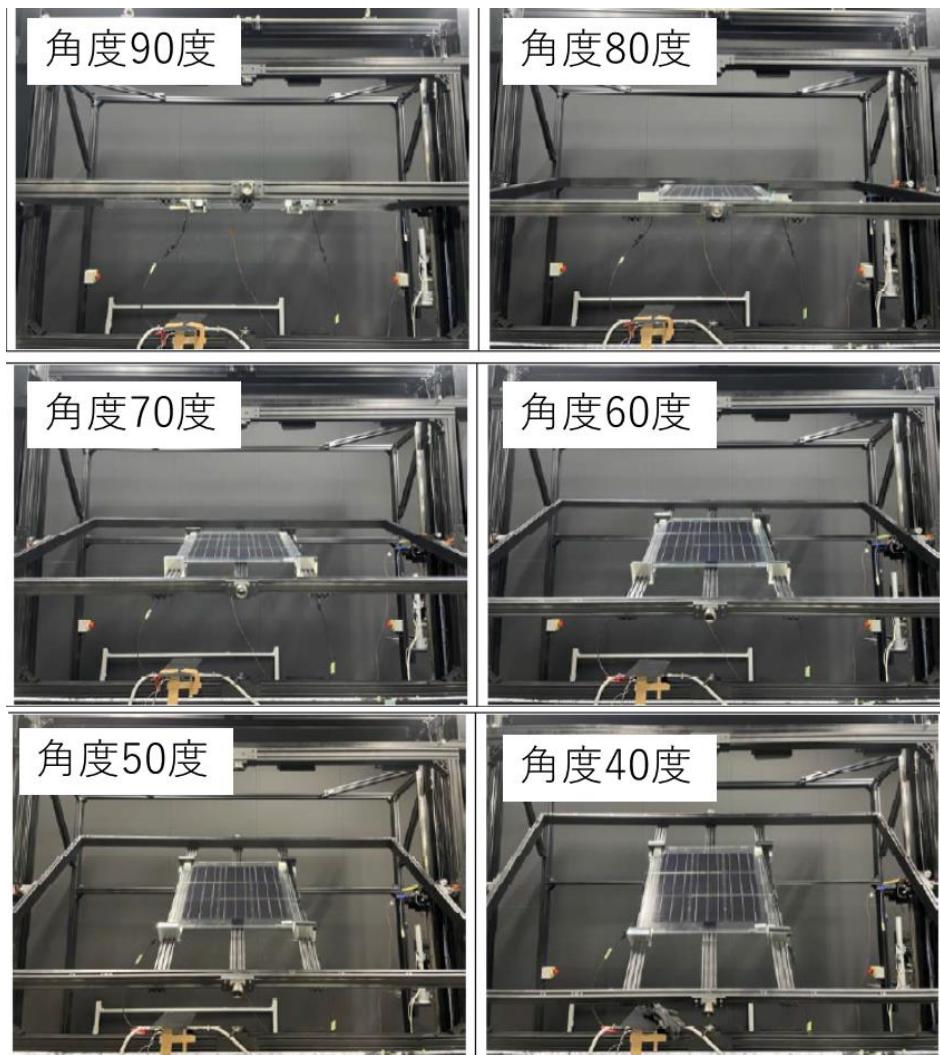


図 2-4 屋内における入射角特性の測定イメージ

入射角特性は、基本的には短絡電流により測定する、測定結果については、入射角が大きくなるにつれて太陽電池面に到達する日射強度が減少するため、cos 特性により測定した短絡電流を補正する必要がある。入射角 0 度の短絡電流の値を基準として、入射角度の cos 特性の値で割り戻した値との比率が入射角特性となる。図 2-5 に cos 特性の割り戻しおよび基準値との比を計算した例を示す。

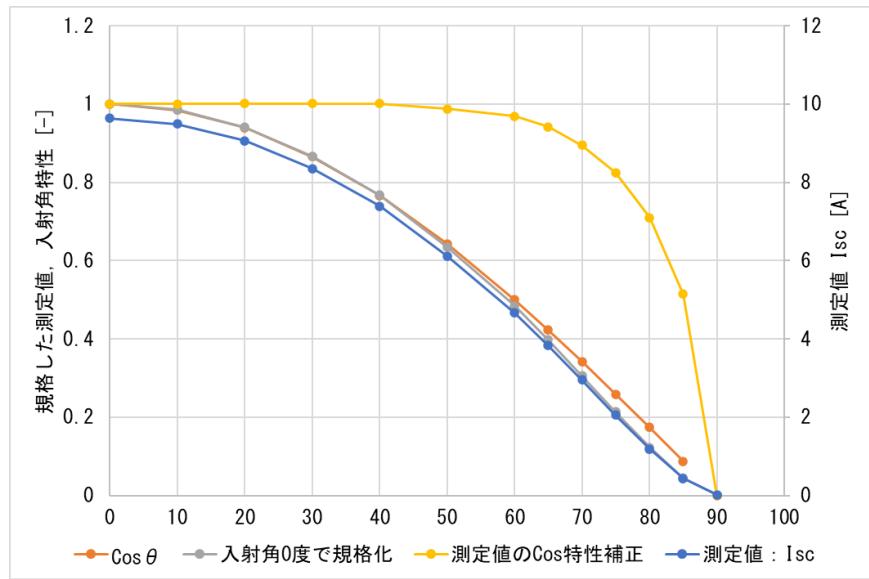


図 2-5 cos 特性の計算結果のイメージ

また、測定条件として、入射角度の分解能を考慮する要がある。入射角が小さいところでは、相対的に入射角特性の影響が小さいことが一般的であるため、10 度ごとの測定を行い、入射角特性が低下しはじめる 60 度より大きい角度では、5 度以下程度の分解能で測定することが望ましい。なお測定結果は、離散値になるため、モデルに導入する際には連続値として利用するための近似が必要となる。前述の ASHRAE IAM モデルなどを利用して近似することで連続値として表現することができる。

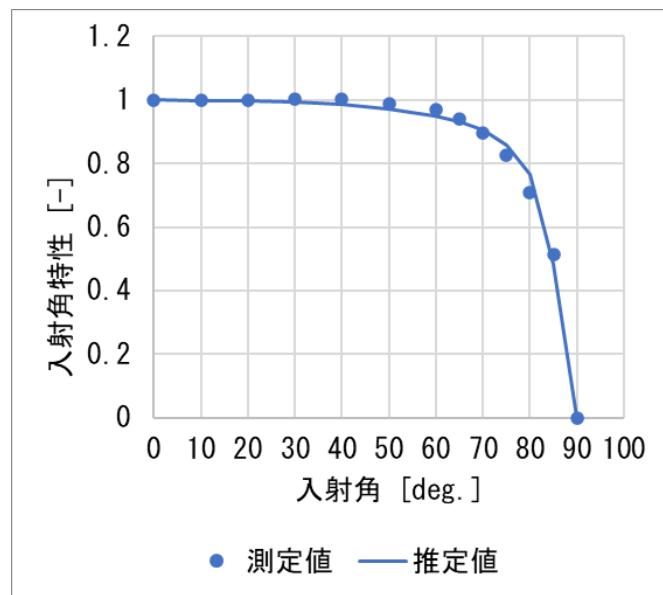


図 2-6 測定値と ASHRAE IAM モデルによる近似例

2.3 入射角特性を考慮可能な発電電力量推定ツール

入射角特性を考慮可能な発電電力量推定ツールとして、PVSYST、SAM/PVWATT、PVLib などがある。PVSYST では、入射角特性を入力することが可能となる。直達成分に関しては、ASHRAE が入っており、それらのパラメータにより調整が可能である。また、実測値などユーザーデータを入力することもできる。散乱、反射成分に関してもモデルは存在するが一律の損失係数としてあらわされる。SAM/PVWATT では、入射角特性モデルは入っているが、デフォルトにて、通常ガラスと (Anti-Reflective)ガラス(正確には防眩ガラスとは異なるが、防眩ガラスに似た概念)の 2 種類の設定となっている。散乱・反射モデルは、前述のモデルがはいっている。PVLib は、Python のオープンソースプログラムであり、ASHRAE モデル、Martin and Ruiz モデルが利用可能である。

2.4 入射角特性補正係数の例

JIS C 8907:2005 太陽光発電システムの発電電力量推定方法において、入射角特性は経時変化補正係数(K_{PD})の内数の非線形応答変動補正係数(K_{PDRN})として定義されている。JIS C 8907 「附属書 2 表 1 設計パラメータの説明及び求め方」における年間の推奨値としては、結晶系において 0.97 とされている。

表 2-1 および表 2-2 は、代表的な入射角特性(防眩無し、有り)を持つ太陽電池モジュールを垂直設置した場合の非線形応答変動補正係数(入射角特性)の計算結果を示す。計算条件は、METPV-20 の水平面日射量(全天、直達、散乱)の平均値データを利用して、Erbs、Perez モデルにより推定した日射量から 2.1 に示すモデルにより計算した結果である。

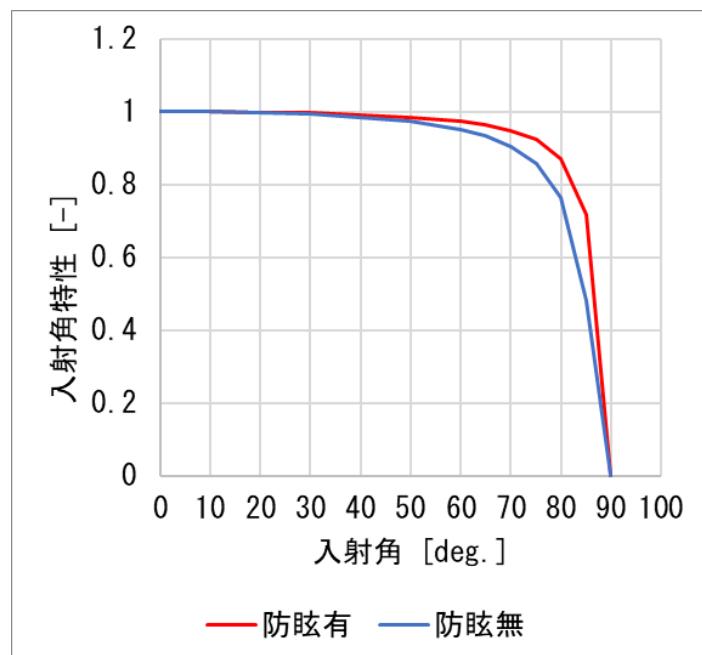


図 2-7 推定に利用した入射角特性

表 2-1 防眩無しの場合の非線形応答変動補正係数(入射角特性補正係数)の例

		非線形応答変動補正係数(入射角特性補正係数)												
地点	方位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
札幌	南	0.974	0.965	0.953	0.937	0.924	0.917	0.921	0.935	0.951	0.965	0.969	0.971	0.949
	西	0.946	0.951	0.956	0.959	0.961	0.958	0.956	0.957	0.952	0.944	0.946	0.945	0.954
	東	0.932	0.951	0.953	0.955	0.952	0.953	0.952	0.953	0.953	0.955	0.953	0.946	0.952
	北	0.953	0.952	0.952	0.944	0.930	0.934	0.935	0.947	0.953	0.952	0.953	0.952	0.950
仙台	南	0.973	0.964	0.952	0.930	0.912	0.919	0.918	0.924	0.945	0.961	0.972	0.974	0.950
	西	0.945	0.950	0.954	0.952	0.952	0.951	0.953	0.955	0.953	0.957	0.951	0.944	0.952
	東	0.945	0.950	0.954	0.952	0.952	0.951	0.953	0.955	0.953	0.957	0.951	0.944	0.952
	北	0.951	0.953	0.952	0.940	0.939	0.922	0.946	0.941	0.952	0.952	0.952	0.952	0.947
東京	南	0.968	0.962	0.951	0.925	0.905	0.915	0.910	0.914	0.938	0.958	0.969	0.971	0.945
	西	0.947	0.951	0.952	0.956	0.958	0.957	0.953	0.956	0.956	0.946	0.936	0.947	0.952
	東	0.941	0.949	0.956	0.954	0.953	0.953	0.952	0.955	0.948	0.954	0.953	0.933	0.951
	北	0.946	0.952	0.951	0.944	0.942	0.941	0.945	0.938	0.951	0.952	0.952	0.950	0.944
名古屋	南	0.972	0.964	0.949	0.923	0.906	0.914	0.909	0.922	0.937	0.958	0.970	0.974	0.948
	西	0.948	0.949	0.953	0.959	0.957	0.958	0.956	0.958	0.959	0.957	0.952	0.944	0.955
	東	0.949	0.953	0.956	0.955	0.953	0.956	0.954	0.954	0.956	0.949	0.941	0.943	0.953
	北	0.952	0.952	0.952	0.948	0.947	0.923	0.937	0.948	0.949	0.952	0.950	0.952	0.946
金沢	南	0.965	0.961	0.948	0.928	0.908	0.898	0.904	0.919	0.940	0.960	0.970	0.972	0.940
	西	0.948	0.948	0.954	0.956	0.955	0.953	0.956	0.955	0.957	0.954	0.949	0.947	0.954
	東	0.948	0.948	0.954	0.956	0.955	0.953	0.956	0.955	0.957	0.954	0.949	0.947	0.954
	北	0.952	0.951	0.953	0.950	0.947	0.935	0.925	0.949	0.951	0.951	0.953	0.953	0.949
大阪	南	0.972	0.961	0.948	0.921	0.901	0.907	0.901	0.916	0.939	0.957	0.970	0.973	0.945
	西	0.943	0.951	0.952	0.957	0.956	0.954	0.954	0.952	0.955	0.957	0.948	0.944	0.953
	東	0.949	0.957	0.956	0.955	0.953	0.954	0.954	0.953	0.957	0.949	0.943	0.942	0.953
	北	0.952	0.951	0.952	0.946	0.946	0.924	0.928	0.949	0.947	0.952	0.947	0.947	0.945
広島	南	0.970	0.962	0.951	0.923	0.903	0.907	0.909	0.912	0.936	0.958	0.968	0.971	0.944
	西	0.945	0.946	0.952	0.955	0.953	0.949	0.953	0.954	0.954	0.954	0.947	0.944	0.951
	東	0.949	0.956	0.953	0.954	0.953	0.954	0.954	0.953	0.955	0.954	0.947	0.946	0.953
	北	0.952	0.951	0.953	0.950	0.947	0.935	0.925	0.949	0.951	0.951	0.953	0.953	0.949
高松	南	0.970	0.962	0.948	0.926	0.909	0.912	0.908	0.914	0.940	0.959	0.968	0.972	0.945
	西	0.946	0.948	0.950	0.952	0.954	0.952	0.952	0.950	0.954	0.953	0.946	0.944	0.951
	東	0.948	0.954	0.955	0.954	0.953	0.951	0.952	0.953	0.955	0.948	0.945	0.943	0.953
	北	0.952	0.951	0.952	0.949	0.948	0.928	0.930	0.950	0.950	0.952	0.950	0.949	0.947
福岡	南	0.965	0.960	0.947	0.931	0.919	0.907	0.905	0.920	0.936	0.955	0.967	0.969	0.944
	西	0.940	0.956	0.948	0.950	0.954	0.952	0.951	0.950	0.952	0.949	0.944	0.945	0.950
	東	0.948	0.946	0.953	0.953	0.959	0.952	0.957	0.954	0.954	0.954	0.949	0.946	0.953
	北	0.952	0.950	0.953	0.952	0.918	0.932	0.923	0.945	0.951	0.952	0.953	0.953	0.949
那覇	南	0.961	0.955	0.936	0.923	0.916	0.908	0.894	0.904	0.926	0.947	0.962	0.965	0.937
	西	0.952	0.952	0.955	0.953	0.952	0.956	0.959	0.958	0.950	0.952	0.945	0.941	0.953
	東	0.947	0.949	0.951	0.953	0.959	0.952	0.953	0.953	0.953	0.957	0.951	0.951	0.953
	北	0.952	0.953	0.952	0.952	0.920	0.914	0.916	0.951	0.952	0.949	0.951	0.953	0.950

表 2-2 防眩有りの場合の非線形応答変動補正係数(入射角特性補正係数)の例

		非線形応答変動補正係数(入射角特性補正係数)												
地点	方位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年間
札幌	南	0.986	0.981	0.975	0.966	0.958	0.955	0.957	0.964	0.973	0.981	0.983	0.984	0.972
	西	0.970	0.973	0.976	0.978	0.979	0.977	0.976	0.977	0.974	0.969	0.971	0.970	0.975
	東	0.963	0.973	0.975	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.974	0.976	0.974	0.971	0.974
	北	0.974	0.974	0.974	0.969	0.962	0.964	0.965	0.971	0.974	0.974	0.974	0.974	0.973
仙台	南	0.985	0.981	0.974	0.962	0.952	0.956	0.955	0.958	0.970	0.979	0.985	0.986	0.973
	西	0.970	0.973	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.975	0.974	0.977	0.973	0.970	0.974
	東	0.970	0.973	0.975	0.974	0.974	0.974	0.974	0.975	0.974	0.977	0.973	0.970	0.974
	北	0.973	0.974	0.974	0.968	0.967	0.957	0.970	0.968	0.974	0.974	0.974	0.974	0.971
東京	南	0.983	0.979	0.973	0.959	0.948	0.954	0.951	0.953	0.966	0.977	0.983	0.984	0.970
	西	0.971	0.973	0.974	0.976	0.977	0.977	0.975	0.976	0.976	0.970	0.965	0.971	0.974
	東	0.968	0.972	0.976	0.975	0.974	0.974	0.974	0.975	0.972	0.975	0.974	0.963	0.974
	北	0.971	0.974	0.974	0.970	0.968	0.968	0.970	0.966	0.974	0.974	0.974	0.973	0.970
名古屋	南	0.985	0.980	0.972	0.958	0.949	0.953	0.950	0.957	0.966	0.977	0.984	0.986	0.972
	西	0.972	0.972	0.974	0.978	0.977	0.977	0.976	0.977	0.978	0.977	0.974	0.969	0.975
	東	0.972	0.974	0.976	0.975	0.975	0.976	0.975	0.975	0.976	0.972	0.968	0.969	0.974
	北	0.974	0.974	0.974	0.972	0.971	0.958	0.966	0.972	0.972	0.974	0.973	0.974	0.971
金沢	南	0.981	0.979	0.971	0.961	0.950	0.945	0.948	0.956	0.967	0.978	0.984	0.985	0.967
	西	0.972	0.972	0.975	0.976	0.975	0.974	0.976	0.976	0.976	0.975	0.972	0.971	0.975
	東	0.972	0.972	0.975	0.976	0.975	0.974	0.976	0.976	0.976	0.975	0.972	0.971	0.975
	北	0.974	0.973	0.974	0.973	0.971	0.965	0.959	0.972	0.974	0.974	0.974	0.974	0.972
大阪	南	0.985	0.979	0.972	0.957	0.946	0.950	0.946	0.954	0.967	0.977	0.984	0.986	0.970
	西	0.969	0.973	0.974	0.977	0.976	0.975	0.975	0.974	0.975	0.977	0.972	0.970	0.974
	東	0.972	0.977	0.976	0.975	0.975	0.975	0.975	0.974	0.977	0.972	0.969	0.969	0.974
	北	0.974	0.973	0.974	0.971	0.971	0.959	0.961	0.972	0.971	0.974	0.971	0.971	0.970
広島	南	0.984	0.979	0.973	0.958	0.947	0.950	0.950	0.952	0.965	0.977	0.982	0.984	0.969
	西	0.970	0.970	0.974	0.976	0.975	0.972	0.974	0.975	0.975	0.975	0.971	0.970	0.974
	東	0.972	0.976	0.975	0.975	0.974	0.975	0.975	0.975	0.976	0.975	0.971	0.971	0.975
	北	0.974	0.973	0.974	0.973	0.971	0.965	0.959	0.972	0.974	0.974	0.974	0.974	0.972
高松	南	0.984	0.979	0.972	0.960	0.951	0.952	0.950	0.953	0.967	0.978	0.983	0.985	0.970
	西	0.971	0.971	0.973	0.974	0.975	0.974	0.974	0.973	0.975	0.974	0.970	0.970	0.973
	東	0.972	0.975	0.975	0.975	0.975	0.973	0.974	0.975	0.976	0.972	0.970	0.969	0.974
	北	0.974	0.973	0.974	0.972	0.972	0.961	0.962	0.973	0.973	0.974	0.973	0.972	0.971
福岡	南	0.981	0.978	0.971	0.962	0.956	0.950	0.948	0.956	0.965	0.976	0.982	0.983	0.970
	西	0.968	0.976	0.972	0.973	0.975	0.974	0.973	0.973	0.974	0.972	0.969	0.970	0.973
	東	0.972	0.971	0.974	0.974	0.978	0.974	0.977	0.975	0.975	0.975	0.972	0.971	0.974
	北	0.974	0.973	0.974	0.974	0.955	0.963	0.958	0.970	0.974	0.974	0.974	0.974	0.972
那覇	南	0.979	0.975	0.965	0.958	0.954	0.950	0.943	0.948	0.960	0.971	0.979	0.981	0.966
	西	0.974	0.974	0.976	0.974	0.974	0.976	0.978	0.977	0.973	0.974	0.970	0.968	0.974
	東	0.971	0.972	0.973	0.974	0.978	0.974	0.974	0.974	0.974	0.977	0.973	0.973	0.974
	北	0.974	0.974	0.974	0.974	0.956	0.953	0.954	0.973	0.974	0.972	0.973	0.974	0.973

3. 実証データを利用した検証結果例

実証データを利用した発電電力量推定モデルの検証結果例について紹介する。

(1) 実証設備

実証データの主な諸元は下記の通り。

- ・設置場所: 山梨県北杜市
- ・太陽電池モジュール: 9セルのうち1セルの短絡電流を測定
- ・防眩有無の比較
- ・日射量: 垂直面日射、直達日射、水平面日射、水平面散乱日射、アルベドを測定

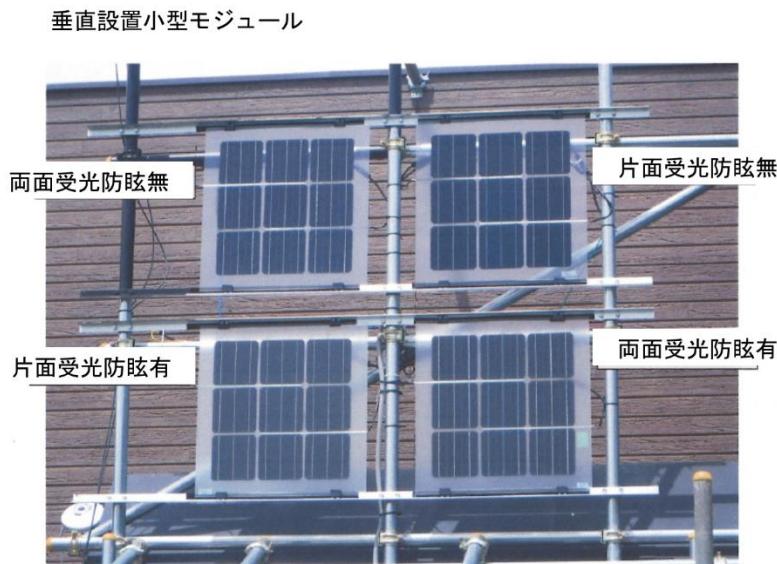


図 3-1 太陽電池モジュールの設置状況

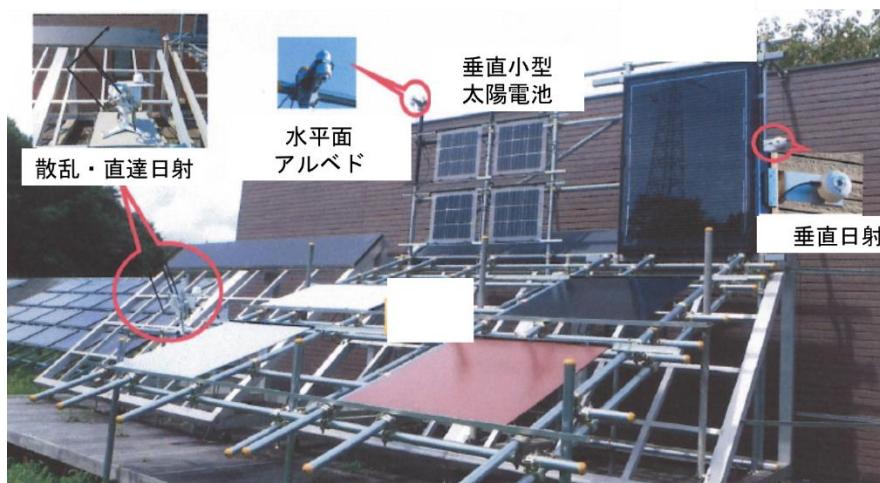


図 3-2 気象センサ等の設置状況

(2) 太陽電池特性

入射角特性は、屋内の実測データを利用した。また、ASHRAE IAM モデルを利用した近似式により連続値として扱った。

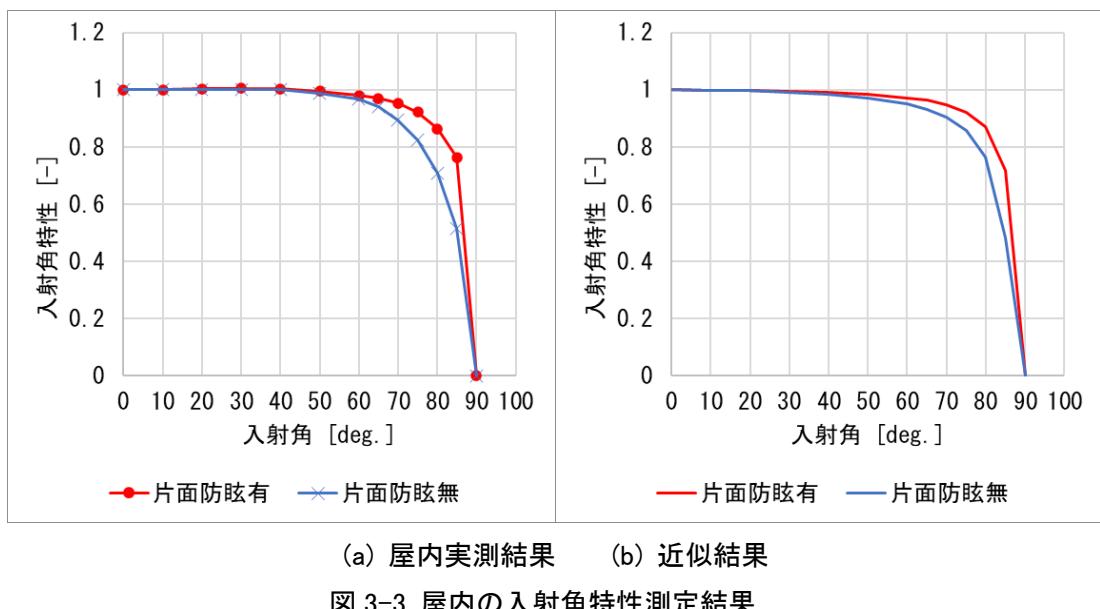


図 3-3 屋内の入射角特性測定結果

(3) 推定モデルの比較

防眩有りの太陽電池モジュールの発電特性を推定する方法として、入射角特性のモデルの違いを考慮するため、下記のモデルによる比較を行った。散乱、反射成分については、2.1 で示した M. J. BRANDEMUEHL モデルを利用した。

- ①入射角特性を考慮しない; 日射量に定格容量を乗じた値
- ②入射角特性を考慮(直達のみ)。防眩無しの特性(屋内測定値)を利用
- ③入射角特性を考慮(直達、散乱、反射)。防眩無しの特性(屋内測定値)を利用
- ④入射角特性を考慮(直達のみ)。防眩有りの特性(屋内測定値)を利用
- ⑤入射角特性を考慮(直達、散乱、反射)。防眩有り(屋内測定値)の特性を利用

図 3-4 は、2021/10～2024/6 まで実測値を利用した推定モデルの比較結果を示す。なお、途中屋内測定のため、屋外計測を中断している。縦軸は月ごとの積算値の推定値/実測値であり、1.0 が推定値が実測値と一致していることを示す。①の入射角特性を考慮しない場合、損失を考慮していないため、推定値が実測値より大きい値になっている。②③は屋内測定した防眩無しの入射角特性を利用した場合の推定結果を示している。防眩無し特性のため、防眩有りよりも損失が多くなることが想定される。③の全成分を考慮した場合推定値が実測値よりも小さくなっていることがわかる。④⑤は屋内測定した防眩有りの入射角特性を利用した結果を示している。全成分を考慮することにより推定値が実測値近い特性を表している。

また推定結果より、直達成分を考慮することで、月ごとに約1%～4%（年間2%）の差、散乱および反射成分の考慮により月ごとに約1%～2%（年間1%）の差があることがわかる。また、防眩無し/有りによる屋内の入射角特性の測定結果の利用有無では、月ごとに約1%～5%（年間2.4%）の発電電力量の推定に差があることがわかる。

図3-5には全期間のデータを利用した結果を示す。縦軸は期間積算値の推定値/実測値、左軸は月ごとの推定値/実測値の標準偏差を示している。防眩有り特性を利用し、全成分を考慮することで月ごとのばらつきが少ないと示し、季節性もより精度よく推定できていることがわかる。

のことから、より正確に壁面PVの発電電力量を推定したい場合は、屋内による入射角特性の測定値および、直達、散乱、反射成分を加味したモデルによる計算することが望ましい。

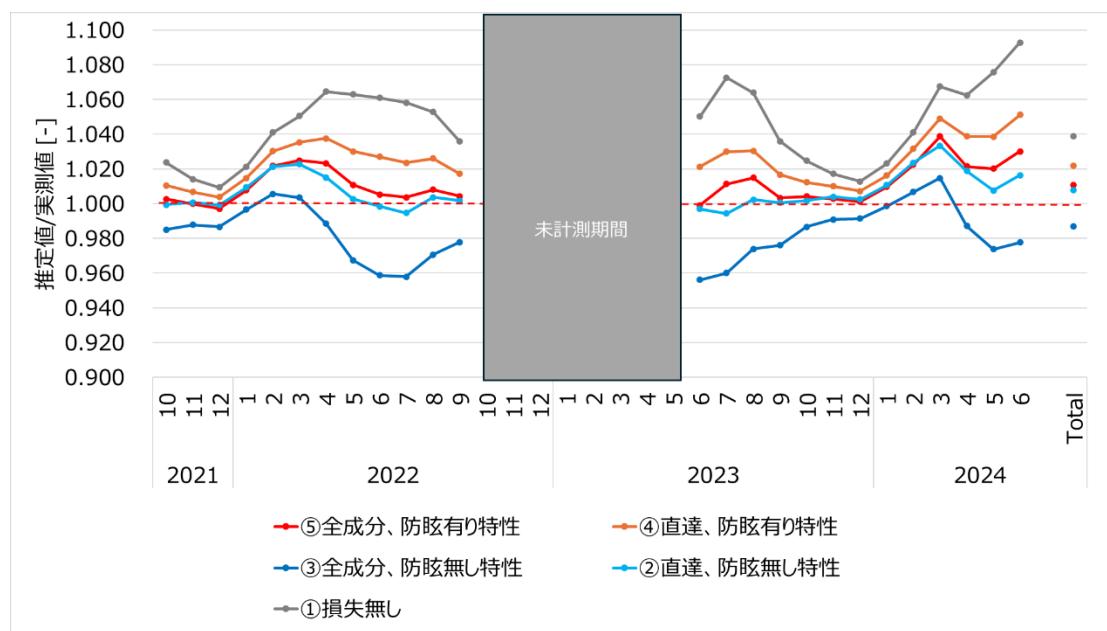


図3-4 推定モデルの比較結果(2021/10～2024/6:月間値)

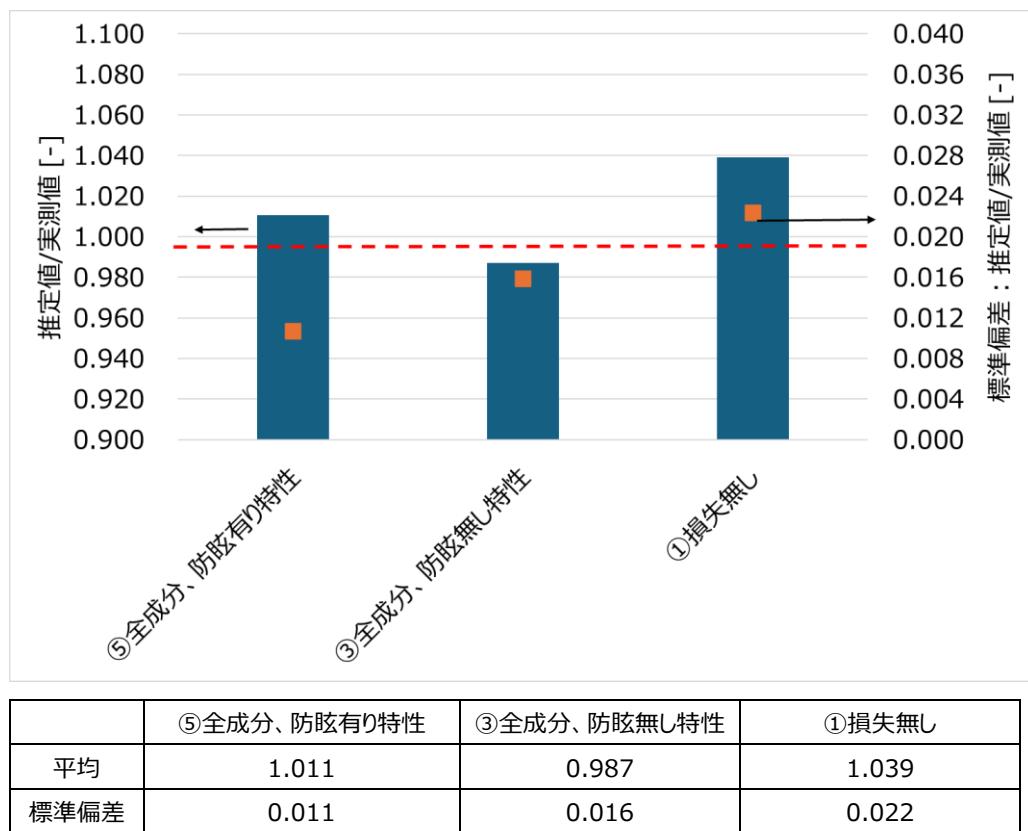


図 3-5 推定モデルの比較結果(全期間)

4. まとめ

壁面 PV の発電電力量を推定する際には、地上設置の場合と比較して、入射角度や日影の影響を十分に考慮した推定方法が求められる。本ガイドラインでは、入射角度の影響(入射角依存性)を中心に、発電電力量推定における注意点をまとめた。また、屋内測定およびそのデータを活用した推定方法についても記載している。壁面 PV を導入する際の基本設計時に参考として活用されたい。

索引

A

AMEDAS	p.3
:アメダス(Automated Meteorological Data Acquisition System)。「地域気象観測システム」であり、雨、風、雪などの気象状況を時間的、地域的に細かく監視するためには、降水量、風向・風速、気温、湿度の観測を自動的に行う気象庁の観測装置	

B

BIM	p.7
:ビルディング・インフォメーション・モデル(Building Information Modeling)。建築物や土木構造物の設計建設及び維持管理時に利用するデータモデルや情報モデル。	

BIPV	p.7
------------	-----

:建材一体型太陽光発電設備(Building Integrated Photovoltaics)

JIS C 8960 番号 254

屋根材、壁材などの建築用部材として一体化した太陽電池モジュール。

JIS C 61730 3.3.2

建物と同時に設計・施工・設置され、建物との相性も抜群の太陽光発電システム。

C

D

E

F

G

H

I

J

K

L

M

METPV	p.3、p.13
: NEDO が公開する年間時別日射量データベース(Meteorological Test data for PhotoVoltaic system)	
MONSOLA	p.3
: NEDO が公開する年間月別日射量データベース(MONthly mean SOLAr radiation data throughout Japan)	

MPPT	p.6
JIS C 8960 番号 448	

: 最大電力点追従制御(Maximum Power Point Tracking)。日射強度及び温度で変化する太陽電池の最大出力動作電圧などに、自動的に追従制御し、太陽電池から得られる電力を最大にする制御方式。

N

O

P

Q

R

S

T

U

V

W

X

Y

Z

あ

アルベド p.5、p.16

JIS C 8960 番号 151

:ある表面の入射光に対する反射光の強さの比。全波長成分についての平均値で表す。太陽光発電の分野においては太陽光に対する地表面の反射率をいう。

い

う

え

衛星推定日射 p.3

:衛星観測データを利用した推定した日射データ。

お

か

き

く

け

傾斜面日射 p.4, p.7

JIS C 8960 番号 331 を利用して一部変更

:水平面に対して傾いた面での日射。傾斜面直達日射、傾斜面散乱日射、並びに地上及び地物からの反射光による日射の和である。測定には、傾斜面に平行に設置した全天日射計を使用する。

こ

さ

散乱成分 p.4, p.8 p.10

JIS C 8960 番号 332 を利用して一部変更

:全天日射のうち、太陽光線が大気を通過する間に、空気分子、雲、エアロゾル粒子などによって散乱される結果生じる日射の成分。

し

システム出力電力量 p.2, p.7

: 太陽光発電システムが出力する電力量。

す

せ

晴天指数 p.4
: 水平面全天日射量を大気外全天日射量で除した値。晴れの日ほど大きな値になる。

そ

ソーラーシミュレータ p.10
: 太陽光に非常に近い照度、分光スペクトルを持った光の照射が可能な装置。

た

太陽電池モジュール (多数・省略)
: 太陽電池セルまたは太陽電池サブモジュールを耐環境性のため外囲器に封入し、かつ規定の出力をもたせた最小単位の発電ユニット

短絡電流 p.10, p.16
JIS C 8960 番号 351
: 太陽電池セル・モジュールの出力端子短絡したときの両端子間に流れる電流。

ち

直散分離 p.4
: 全天日射データから直達成分と散乱成分を推定すること。

直達成分 p.4, p.5, p.8, p.9, p.10, p.13, p.17
JIS C 8960 2012 番号 337 を利用して一部変更
: 全天日射のうち、太陽から地表に直接到達する日射の成分。

つ

て

低照度特性 p.6

: 日射量が小さい時の太陽電池の発電特性。

天空率 p.5, p.7

: 天空の占める立体角投射率。ある地点からどれだけ天空が見えるかの割合。

と

な

に

日射量 (多数・省略)

JIS C 8960 番号 340

: ある一定期間(1時間、1日、1週間、1ヶ月、1年など)の日射強度の積分値。日射強度と同様に“直達”、“散乱”、“全天”、“傾斜面”及び“アレイ面”的接頭語を付けて使用する。必要に応じて“日積算”、“年積算”などの接頭語を付ける(例えば、日積算全天日射量)。主としてシステムで用いる。

入射角特性 (多数・省略)

: 入射角により変化する太陽電池の発電特性。標準試験状態では、入射角0度で測定するため、そこからの変化する特性。

入射角 (多数・省略)

JIS C 8960 番号 372

: 日射を受ける面の法線と太陽像中心の方向とのなす角度。0~90度の範囲で法線と太陽像中心の方向が一致するとき(垂直入射)を0度とする。

ぬ

ね

の

は

反射成分 p.5、p.8、p.13、p.17

: 全天日射のうち、地表面等から反射する日射の成分。

ひ

日陰 p.5、p.7

非線形応答変動補正係数 p.13

JISC8907:2005 附属書 2 表 1

: 非線形応答変動補正係数は、入射光のモジュールガラス面での反射を補正する係数である。

ふ

へ

ほ

防眩 p.13、p.14、p.15、p.16

: まぶしさを防止すること。太陽電池では、太陽電池面での反射を防ぐような処理を行った製品が防眩型。

ま

み

ミスマッチ損失 p.6

JIS C 8960 2012 番号 320 を利用して一部変更

: 直列又は並列に接続した太陽電池セル・モジュールの最大出力が、電流電圧特性の不均一性のため、同一条件下で測定した個々のセル・モジュールの最大出力の合計よりも少なくなることによる損失。

む

め

ψ

ら

り

る

れ

ろ

わ

この成果物は、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「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発（壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定）」の結果として得られたものです。