

CO₂ゼロ工場実現に向けた自家消費型太陽光発電システムの導入条件最適化手法

Optimization Method for Introducing Conditions of Self-consumption Type Photovoltaic Power Generation System for Realizing CO₂ Zero Emission Factory

溝 端 竜 也
Tatsuya Mizobata

岡 市 敦 雄
Atsuo Okaichi

山 下 英 毅
Hideki Yamashita

要 旨

発電した電力を売電せず、設置した需要家内で消費することを目的とした自家消費型太陽光発電では、傾斜角や方位角などの導入条件の最適化により電力自給率を最大化することが望ましい。ところが、この最適導入条件は、総発電量を最大化する従来の導入条件と異なるという問題がある。そこで、任意の導入条件に対して電力自給率などのシステム評価指標を算出できる評価モデルを構築し、目標の電力自給率を最小構成で実現する導入条件の最適化手法を開発した。実データを用いてその有効性を評価した結果、従来手法と比較して、同等の電力自給率の達成に必要な発電設備容量を最大で5%削減できることを確認した。

Abstract

In self-consumption type photovoltaic power generation, which is aimed at consuming the generated power on the consumer's premises without selling it, it is desirable to optimize installation conditions such as the tilt angle and azimuth to maximize the self-consumption amount. However, there is a problem that this optimum installation condition is different from the conventional installation condition that maximizes the total power generation. Therefore, we have developed a method to construct an evaluation model that can calculate the system evaluation index such as power self-sufficiency rate for arbitrary installation conditions, and derive an optimal installation condition that achieves the target power self-sufficiency rate with the minimum configuration. As a result of evaluating its effectiveness using actual data, it was confirmed that the power generation equipment capacity required to achieve the same electric power self-sufficiency rate could be reduced by up to 5% compared to the conventional method.

1. はじめに

パリ協定では、今世紀後半までに温室効果ガス排出を実質ゼロにする目標が掲げられ、世界各国で取り組みが進められている。当社は、環境ビジョン2050において、使うエネルギーを超えるクリーンなエネルギーの創出・活用を目指したCO₂ゼロの工場づくりの推進を宣言した。

当社の目指すCO₂ゼロ工場では、省エネによるCO₂削減努力は継続しながら、100%再生可能エネルギー（以降、再エネ）由来の電力と、化石燃料由来のCO₂排出を相殺するCO₂クレジットを組み合わせ、CO₂排出実質ゼロを実現する。これまでに自拠点へ導入した太陽光発電（Photovoltaic, PV）は、2018年度時点で2.5万MWhに達した。今後のさらなる排出削減に向け、再エネ電力契約や非化石電源からつくられた電力の環境価値を証書化した非化石証書などの調達手段も検討できるが、中長期的な持続性は不透明である。したがって、外部調達のみには依存せず、自拠点の再エネ導入比率目標を設定し、導入推進することは重要である。

一方、再エネの導入拡大により、電力系統への逆潮流が増加すると、電力系統の空き容量不足が懸念される[1]。電力系統に空きがない場合、発電した電力の逆潮流が認められず、大規模な太陽光発電の導入が難しい。そこで、

自拠点の電力需要に合わせて出力制御することで、電力系統へ影響を与えず再エネ導入できる全量自家消費型太陽光発電への期待が高まっている。

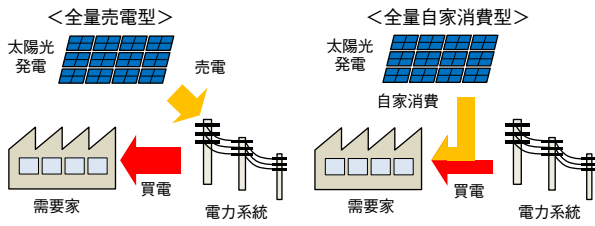
ここで、太陽光発電の設置拠点における電力自給率は、発電量と電力需要のバランスで決まる点に留意する必要がある。すなわち、発電量だけでなく電力需要の状況も考慮したシステム設計が必要である。これまでの全量売電を前提とした条件では、経済合理性が主眼に置かれ、自家消費の観点から電力需要を踏まえた太陽光発電の傾斜角や方位角などの導入条件の検討は十分行われていない[2]。

そこで、全量自家消費型太陽光発電の評価モデルを構築し、それを活用した導入条件の最適化手法を開発した。

2. 全量自家消費型太陽光発電の概要

第1図および第1表に全量売電型および全量自家消費型太陽光発電の比較を示す。なお、余剰売電型太陽光発電は両者の中間的な位置付けのため記載を割愛する。

固定価格買取制度が開始された2012年において、40円/kWh（10 kW以上の場合）であった売電単価は、2020年時点で12円/kWh（50 kW～250kWの場合）まで下落し、需要家の買電単価を下回るケースも発生している[3]。今



第1図 太陽光発電システムの比較
Fig. 1 Comparison of PV systems

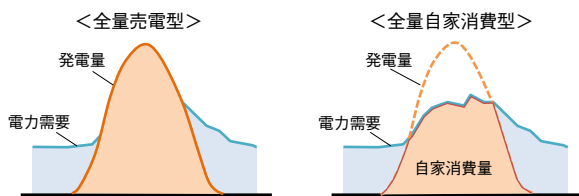
第1表 太陽光発電システムの発電電力利用形態の比較
Table 1 Comparison of power generation usage of PV systems

項目	全量売電型 太陽光発電システム	全量自家消費型 太陽光発電システム
導入の前提条件	売電が買電より高単価	売電が買電より低単価 電力系統の空き容量不足
メリット	売電収入の獲得	電気代・CO ₂ の削減 出力抑制の影響を受けない
デメリット	出力抑制の影響を受ける	需要を超える発電量は 利用できない
導入条件の設計目標	発電量の最大化	電力自給率の最大化 電力自給率目標の達成

後、さらに売電単価が低下した場合、相対的な自家消費のメリットはますます高まると考えられる。

全量自家消費型太陽光発電における発電量と電力需要の関係を図2に示す。各時刻において、自拠点で発電した電力のうち電力需要を下回る部分が自家消費量となる。

電力自給率は、一定期間において全電力需要に占める全自家消費量の割合で定義され、所定の目標達成または最大化することが求められる。同様に、自家消費率は、全発電量に占める自家消費量の割合で定義され、設備利用率向上のためには高いほど良い。なお、自家消費量が大きいほど買電が減るため、CO₂削減と電気代削減は両立する。



第2図 全量自家消費型太陽光発電における発電量と電力需要
Fig. 2 PV generation and power demand in self-consumption PV

電力自給率を向上するためには、第2図で示す発電量と電力需要とが重なる面積を増加させる必要がある。そ

こで、太陽光発電の設置傾斜角、方位角、および容量が、発電量の大きさと推移形状を変化させる点に着目した。つまり、所与の電力需要に対し、電力自給率が最大化するように上記の導入条件を最適化することが可能である。

ところが、設置地点ごとの傾斜角や方位角の発電量への影響は、時間帯や季節に対して非線形な関係を持つ。さらに電力需要との相互関係で自家消費量が決まるため、簡易に見積もることができない。

そこで、既往の日射理論計算手法などに基づき、任意の導入条件に対応した年間時別発電量を一意に計算できるモデルを作成した。さらに当該モデルを活用した感度分析を行うことで、導入条件の最適化を試みた。

全量自家消費型太陽光発電の導入を検討する需要家を対象として、電力自給率の最大化または電力自給率目標を達成するための最適導入条件の提供を目的とした評価システムの構築とその評価を行った。

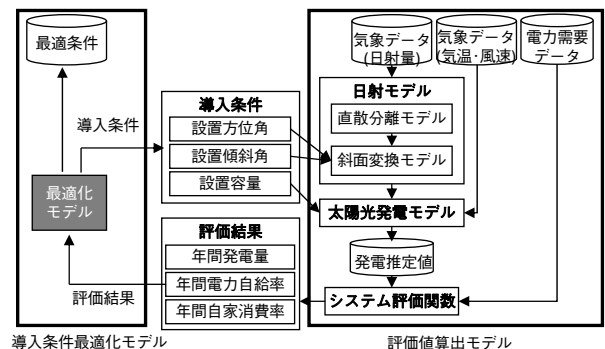
3. システム評価モデル

第3図に全量自家消費型太陽光発電のシステム評価モデルを示す。本評価モデルは、評価値算出モデルと、導入条件最適化モデルで構成される。

評価値算出モデルは、所定地点および導入条件における年間時別発電量を推定し、年間電力自給率などの評価値を算出する。汎用性のある入力条件および気象データを用いるため、国内の任意条件へ適用が可能である。

本モデルは、さらに、後述する日射モデル、太陽光発電モデル、システム評価関数から構成される。

導入条件最適化モデルは、上記評価値算出モデルをブラックボックス関数とみなし、所定の導入条件や制約条件の下で最適化計算を行う。これにより、人手による都度計算では困難な最適設置条件の導出を自動で行うことができる。



第3図 太陽光発電システム評価モデル
Fig. 3 Model for PV system evaluation

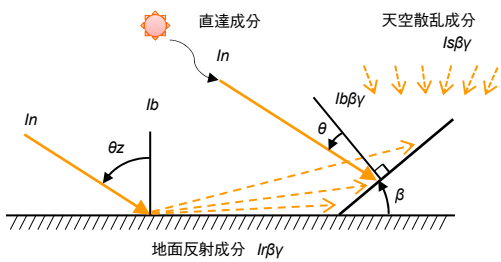
3.1 日射モデル

本モデルでは、日射量データベースにおける水平面全天日射量 I_g から、任意の設置方位角・傾斜角において太陽光発電パネルが受ける傾斜面日射量への変換を行う。

(1) 式のとおり、傾斜面日射量 $I_{\beta\gamma}$ は、直達成分 $I_{b\beta\gamma}$ 、天空散乱成分 $I_{s\beta\gamma}$ 、地面反射成分 $I_{r\beta\gamma}$ の3成分からなる。

$$I_{\beta\gamma} = I_{b\beta\gamma} + I_{s\beta\gamma} + I_{r\beta\gamma} \dots \dots \dots (1)$$

初めに、各成分は独立に傾斜角の影響を受けるため、Erbsモデル[4]を用いて、水平面全天日射量 I_g から直達成分 I_b を分離する。



第4図 地表における日射量成分
Fig. 4 Insolation component on the surface

〔1〕 直達成分

太陽光に垂直な法線面日射量を I_n とすると、第4図から水平面および斜面の直達成分 I_b および $I_{b\beta\gamma}$ について (2) 式 (3) 式が成り立つ。なお、 θ_z は天文学計算により求まる毎時の天頂角、 θ は日射入射角を示す。

$$I_b = I_n * \cos \theta_z \dots \dots \dots (2)$$

$$I_{b\beta\gamma} = I_n * \cos \theta \dots \dots \dots (3)$$

ここで、(2) 式を (3) 式に代入することで (4) 式が求まる。

$$I_{b\beta\gamma} = I_b * \cos \theta / \cos \theta_z \dots \dots \dots (4)$$

〔2〕 天空散乱成分

天空散乱日射 $I_{s\beta\gamma}$ を、全天空一様な成分、太陽周辺から到達する成分、地平線付近から到達する成分の3成分で表現するPerezのanisotropicモデル[5]を用いて計算する。

〔3〕 地面反射成分

地表面に達した日射が全方向均一に反射されるとした均一反射モデルを用いて計算する。地表の反射率を表すアルベドは0.2を用いた。

$$I_{r\beta\gamma} = I_g * \rho(1 - \cos \beta) / 2 \dots \dots \dots (5)$$

I_g : 水平面全天日射量 [kW/m²]
 ρ : アルベド [-]

3.2 太陽光発電モデル

太陽光発電パネルへの入射日射量から時別の発電量 P

の推定には、JIS C 8907[6]を参考に (6) 式および当該規格推奨値のパラメータを用いた (第2表)。なお、昨今のインバータ性能水準を鑑み η_{INO} は修正し用いた。

$$P = P_{AS} * I_{\beta\gamma} * K_{PD} * K_{PM} * K_{PA} * \eta_{INO} * K_{PT} \dots \dots (6)$$

$$K_{PT} = 1 - 0.45(T_{PA} - 25) / 100 \dots \dots \dots (7)$$

$$T_{PA} = T_A + \left(\frac{46}{0.41 * V^{0.8}} + 2 \right) * I_{\beta\gamma} - 2 \dots \dots \dots (8)$$

- P_{AS} : 標準太陽電池アレイ出力[kW]
- $I_{\beta\gamma}$: 傾斜面日射量[kW/m²]
- K_{PT} : 温度補正係数[-]
- T_{PA} : 太陽電池アレイ温度[°C]
- T_A : 外気温度[°C]
- V : 風速[m/s]

第2表 太陽光発電推定用パラメータ
Table 2 Parameters for estimation of PV

経時変化補正係数 (K_{PD})	0.95
アレイ負荷整合補正係数 (K_{PM})	0.94
アレイ回路補正係数 (K_{PA})	0.97
インバータ実効効率 (η_{INO})	0.95

3.3 システム評価関数

本システムの評価指標を、時別発電量 P_i および時別電力需要 D_i を用いて、以下のとおり計算をする。

$$\text{年間発電量 [kWh]} = \sum_{i=0}^n P_i \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{年間電力自給率 [\%]} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{Min}(P_i, D_i)}{\sum_{i=0}^n D_i} * 100 \dots \dots (10)$$

$$\text{年間自家消費率 [\%]} = \frac{\sum_{i=0}^n \text{Min}(P_i, D_i)}{\sum_{i=0}^n P_i} * 100 \dots \dots (11)$$

n : 年間総時間数-1

3.4 導入条件最適化モデル

本モデルでは、所定の最適化条件を組み合わせたブラックボックス最適化を行い、最適導入条件を導出する。本稿で用いた最適化モデルの設定条件を第3表に示す。

第3表 最適化モデルの設定条件
Table 3 Setting conditions for the optimization model

目的関数	制御変数	制約条件
maximize : 年間発電量	設置方位角, 設置傾斜角	なし
maximize : 年間電力自給率	設置方位角, 設置傾斜角	なし
minimize : 設置容量	設置方位角, 設置傾斜角, 設置容量	年間電力自給率 ≥ 目標自給率

4. シミュレーション評価

当社の実工場3拠点を対象として、開発したシステム評価モデルの実データによる適用評価と、導入条件最適化による効果試算のためのシミュレーションを行った。第4表に本評価におけるシミュレーション条件を示す。

第4表 シミュレーション条件
Table 4 Condition of simulation

項目	内容	
気象データ (日射量, 気温, 風速)	METPV-11 平均年データ 対象工場の近傍地点を利用	
電力需要	評価期間	1年間
	評価間隔	1時間
	工場種別 (需要規模)	デバイス製造工場 (2900 kW) アセンブリ系工場 (1395 kW) R&D併設型工場 (3126 kW)
太陽光発電	導入条件	設置方位角 (-180°~180°) 設置傾斜角 (0°~60°) 設置容量 (0 kW~20 000 kW)

本評価ではNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）が公開する国内837地点に対応した日射量データベース[7]を利用し、年間を通じて平均的な条件を想定するため、平均年データを選択した。

電力需要は変動パターンの違いを考慮し、国内の3種類の工場データを利用した。デバイス製造工場では24時間稼働の生産ラインが占める要因が大きく、比較的平準なパターンである。一方、アセンブリ系工場やR&D併設型工場では、人による組み立て・事務所作業や試作品製造などの要因が大きい。そのため設備稼働や空調負荷に起因する昼夜または季節による需要変動が大きい。

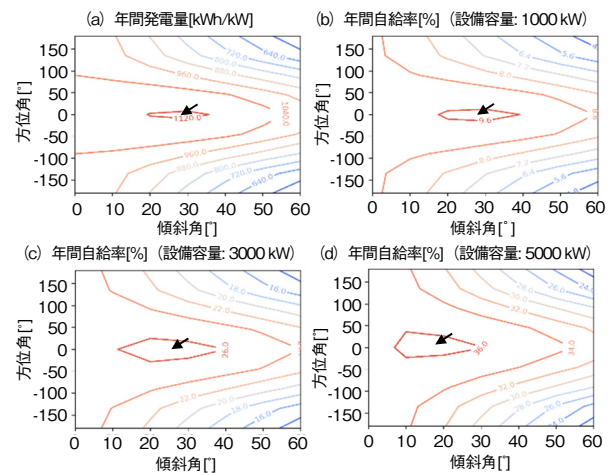
本評価では、太陽光発電の導入条件を変数とし、設置方位角は南:0°, 西:90°, 東:-90°と定義する。初めに、所定の設置容量において、年間電力自給率に対する導入条件の影響を把握するため、設置方位角・傾斜角を変更したシミュレーションを行い、その分布と最適条件を評価する。

さらに、所定の年間電力自給率を満たす必要最小限の設置容量およびそのときの最適導入条件を導出する。

4.1 年間電力自給率の最適条件分析

第5図に、R&D併設型工場における太陽光発電の設置方位角・傾斜角ごとの設置容量1kWあたりの年間発電量[kWh/kW]と、設置容量別の年間電力自給率[%]を示す。また、それぞれを最大化する最適設置条件を図中矢印と第5表、第6表に示す。

第5図 (b) のように電力需要に対して設置容量が小さ



第5図 導入条件ごとの年間発電量および年間電力自給率分布

Fig. 5 Annual PV generation and electricity self-sufficiency rate distribution

第5表 年間発電量を最大化する最適導入条件

Table 5 Optimal conditions maximizing annual PV generation

地点	方位角[°]	傾斜角[°]	発電量[kWh/kW]
大阪	-2.1	28.0	1130

第6表 年間電力自給率を最大化する最適導入条件

Table 6 Optimal conditions maximizing the self-sufficiency rate

設置容量 [kW]	方位角[°]	傾斜角[°]	自給率[%]
1000	-0.5	28.1	9.7
3000	-0.4	25.4	26.5
5000	6.6	17.9	36.3

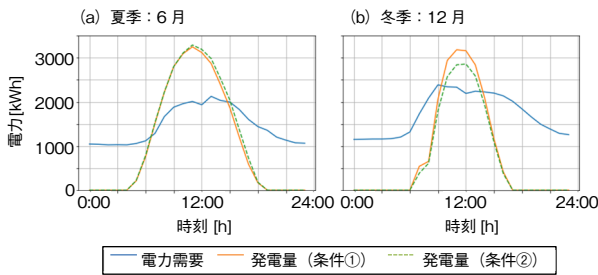
い場合、発電量の大部分が自家消費されるため、第5図 (a) に示す年間発電量最大化条件と近い結果となる。一方、設置容量を増加させると、最適方位角はやや西方向へシフトし、傾斜角は水平方向へシフトすることがわかった。

夏季および冬季の代表日の例 (第6図) を用いて、導入条件の電力需要と発電量の特別積算量の相互関係に与える影響を説明する。なお、発電量は設備容量5000 kWにおいて年間発電量を最大化する条件 (条件①) および年間電力自給率を最大化する条件 (条件②) で算出した。

夏季において、条件②は条件①と比べて傾斜角が浅く、方位角はやや西方向にシフトするため、午後の広範囲にわたり発電量が増加した。一方、冬季においては、その優位性が逆転する。しかし、条件①は条件②に対して電力需要と発電量の重複関係に関与しない最大発電時を中心に発電量が増加するため、相対的な自給率への影響は小さい。

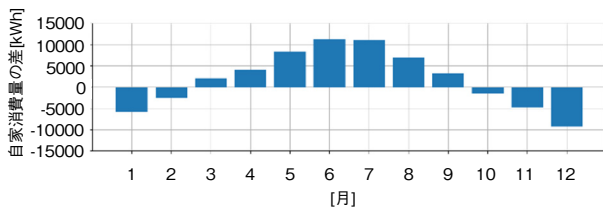
第7図に、自家消費量 (電力需要と発電量の重複部分) の月積算値の差 (条件②-条件①) を示す。

前述のとおり、夏季と冬季で優位関係が逆転すること



第6図 代表日の電力需要と発電量の比較
Fig. 6 Power consumption and PV generation on representative days

がわかる。条件②の自家消費量は、条件①と比べ、3月～9月において、合計で47 103 kWh大きく、10月～2月において合計で23 851 kWh小さい。したがって、年間を通じて計算すると条件②の自給率が上回る結果となった。



第7図 月積算自家消費量の差
Fig. 7 Difference in the monthly self-consumption of PV generation

4.2 年間電力自給率目標を達成するための最適条件分析

ここでは、需要家における所望の年間電力自給率の達成を制約条件とした導入条件の最適化を検討する。第7表に年間電力自給率目標を20%、30%、40%に設定したときの、太陽光発電の設置容量を最小化する最適条件および年間自家消費率を示す。

各需要家において、年間電力自給率が高いほど方位角は西方向、傾斜角は水平方向に最適条件がシフトする結

第7表 年間電力自給率の目標を達成する最適導入条件
Table 7 Optimal conditions satisfying the annual self-sufficiency target

年間電力自給率 [%]	最適導入条件			自家消費率 [%]	
	方位角 [°]	傾斜角 [°]	容量 [kW]		
デバイス製造工場	20	-2.3	25.4	3709	98.6
	30	-1.7	14.3	7101	78.7
	40	9.0	4.8	18 182	42.6
アセンブリ系工場	20	1.6	27.4	896	93.5
	30	6.5	20.0	1564	80.9
	40	16.4	10.1	2828	61.2
R&D併設型工場	20	-3.0	25.4	2141	95.2
	30	-1.4	23.6	3570	85.8
	40	12.7	13.4	6362	65.6

果となった。なお、他の需要家と比較して需要変動が平準なデバイス製造工場で電力自給率を高める場合、夜間の電力は太陽光発電で賄えず、電力需要に対して設備容量を大きく設定する必要があるため、自家消費率が大きく低下する。このように、設置可能な設備容量も念頭に入れ、適切な電力自給率目標と導入条件の検討が必要となる。

比較のための従来方式として、日本国内において発電量を最大化する最適条件として一般的に用いられる方位角0°および傾斜角30°を比較条件として評価を行った。

比較条件を用いて年間電力自給率目標を満たす最小設置容量を計算し、前記最適条件による設置容量削減率を評価した (第8表)。

年間電力自給率目標が高いほど、最適条件による削減率は高まり、自給率目標40%の場合、最大で5%程度の設置容量削減効果が得られることがわかった。

第8表 最適導入条件の適用による設置容量削減効果
Table 8 Installation capacity reduction by optimum conditions

年間電力自給率 [%]	設置容量 [kW]		設置容量削減率 [%]	
	比較条件	最適条件		
デバイス製造工場	20	3718	3709	0.2
	30	7260	7101	2.2
	40	19 182	18 182	5.2
アセンブリ系工場	20	897	896	0.1
	30	1581	1564	1.1
	40	2941	2828	3.8
R&D併設型工場	20	2142	2141	0.1
	30	3588	3570	0.5
	40	6541	6362	2.7

5. まとめ

本稿では、全量自家消費型太陽光発電のシステム評価モデルと工場の実需要データに基づき、所望の電力自給率を達成する最適導入条件を導出できることを示した。

分析の結果、工場種別と年間電力自給率の目標水準に応じた最適条件が得られ、最大で5%程度の設置容量削減が可能であることがわかった。

今後は、本成果を活用した再エネの導入推進に加え、蓄電池などを組み合わせ、さらなる自家消費率の向上を図る。また、ピークカットやBCP (Business Continuity Plan) 機能などの提供も加え、顧客価値をより高めることで、再エネの導入障壁を引き下げていく。このようにして、国内外の自社拠点におけるCO₂ゼロ工場を順次増やし、環境負荷の低い持続可能な事業活動の実現を目指していく。

参考文献

- [1] 九州電力(株), “九州本土の再生可能エネルギー発電設備に対する接続申し込みの回答保留について,” <http://www.kyuden.co.jp/var/rev/0/0043/8139/we24tq6gr.pdf>, 参照 Oct. 26, 2020.
- [2] 入佐佳史 他, “太陽光パネルの地域に適した設置条件の最適化に関する検討,” 日本機械学会 第24回設計工学・システム部門講演会講演論文集, vol. 2014.24, no. 3306, 2014.
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁, “過去の買取価格・期間等,” https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/kakaku.html, 参照 Oct. 26, 2020.
- [4] D. G. Erbs et al., “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,” *Solar Energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293-302, 1982.
- [5] R. Perez et al., “Modeling Daylight Availability and Irradiance from Direct and Global Irradiance,” *Solar Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271-289, 1990.
- [6] 日本工業規格 JIS C 8907, 太陽光発電システムの発電電力量推定方法, 2005.
- [7] 年間時別日射量データベース(METPV-11), NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構), 2015.

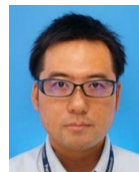
執筆者紹介



溝端 竜也 Tatsuya Mizobata
ライフソリューションズ社
ソリューション開発本部
Solution Development Div.,
Life Solutions Company



岡市 敦雄 Atsuo Okaichi
ライフソリューションズ社
ソリューション開発本部
Solution Development Div.,
Life Solutions Company



山下 英毅 Hideki Yamashita
マニファクチャリングイノベーション本部
マニファクチャリングソリューションセンター
Manufacturing Solution Center,
Manufacturing Innovation Div.,