

# 道路・駐車空間を活用した 太陽光発電・蓄電池大量整備による ゼロエミッション化に関する研究

三宅 勇太郎<sup>1</sup>・加藤 純大<sup>2</sup>・室町 泰徳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系  
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-5)

E-mail: miyake.y.aj@m.titech.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系  
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-5)

E-mail: kato.j.aa@m.titech.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系  
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-5)

E-mail: muromachi.y.aa@m.titech.ac.jp

太陽光発電は季節、天候、周辺環境等による出力の変動が大きく、供給量のコントロールが困難なため、大量整備に際しては計画的な導入とそれを支えるエネルギー貯蔵システムの構築が重要となる。しかし、都市におけるエネルギー需給の変動や具体的な整備空間についての検討は十分になされていない。今後、太陽光発電を主力電源としてゼロエミッション化を図る上で、エネルギーを安定的かつ効率的に利用するためには、エネルギー需給の変動を把握し、蓄電池等のエネルギー貯蔵システムと組み合わせた総合的な都市エネルギーシステムを構築することが重要となる。その際には道路・駐車空間といった交通空間の活用も図るべきであろう。本研究では、首都圏を中心とした地域を対象として、太陽光発電による発電可能性と整備可能空間、季節や天候による供給量の変動を明らかにしている。さらに、これに対応する上で必要となる蓄電池の導入量、整備空間量について検討することを目的としている。

**Key Words :** *Solar Power System, Electricity Storage System, Road Space, Parking Space, Zero Emission*

## 1. はじめに

### (1) 背景と目的

日本は約30年後の2050年に温室効果ガス排出量を80%削減し、21世紀後半の早い時期に100%削減する、すなわちゼロエミッション化することを公約としている。運輸部門においても同等の削減率を求められることは確実であり、2030年のパリ協定の目標28%削減を満たしつつ、長期的な目標を視野に入れた政策を進めていく必要がある。本論文では、このような視点に立ち、運輸部門のみならずエネルギー部門や建物部門との連携を考慮しながら、運輸部門のゼロエミッション化の可能性とこれを実現するための交通政策に関する検討を行う。まず、第一に、運輸部門に対する再生可能エネルギーによるエネルギー供給の可能性を検討する。運輸部門のゼロエミ

ッション化においては、道路交通システムを再生可能エネルギーベースに転換することが重要な課題の1つであり、運輸部門とエネルギー部門間連携のあり方の1つとして道路空間を含めた太陽光発電の施設設置とこれによるゼロエミッション電源の確保の可能性を検討する。また、太陽光発電による再生可能エネルギーを運輸部門に供給するためには、建物部門、特に都心の駐車空間等を活用した蓄電池等を経由させる可能性が高く、これによる建物部門と運輸部門との連携に関する方策に関しても検討を行う。

### (2) 既往研究と本研究の位置づけ

太陽光発電は季節、天候、周辺環境等による出力の変動が大きく、供給量のコントロールが困難なため、大量整備に際しては計画的な導入が重要となる。また、空間的に適切に導入すれば、ならし効果によ

り出力の変動を抑制することができる可能性がある。例えば、大関他<sup>1)</sup>は、半径100kmという広域におけるならし効果を、実測値に基づく分析によって評価し、時間窓やエリア半径によってどの程度の変動となるかを示した。名古屋他<sup>2)</sup>は、同期変動とランダム変動の合成として太陽光発電の変動特性を表現できるとする「遷移仮説」を提案し、それを用いて出力変動を想定する手法を示した。そして、算出した値と実測値を比較することでその妥当性を示した。加藤他<sup>3)</sup>は、遷移仮説を応用し、代表1点の観測データを用いて一定範囲内の空間平均日射変動特性を表すため、LPFを構築し、広域での空間平均日射量を算定、変動特性の評価を行っている。最近では、駒見他<sup>4)</sup>が遷移仮説における遷移周期がどのような要因によって影響を受けるかを検討している。しかし、道路空間を含めた太陽光パネルの具体的な設置場所とこれによる地域の太陽光発電による出力の変動についての検討は十分になされていない。

また、太陽光発電の出力の変動に対して適切な蓄電池容量を確保して対応することも考えられる。Solomon et al.<sup>5)</sup>、Solomon et al.<sup>6)</sup>は数理的手法を用いて太陽光発電の出力の変動に対して必要となる蓄電池容量を計算している。ただし、蓄電池の設置場所といった空間的な検討はなされていない。

さらに、今後、太陽光発電を主力電源としてゼロエミッション化を図る上で、エネルギーを安定的かつ効率的に利用するためには、エネルギー需給の変動を把握し、蓄電池等のエネルギー貯蔵システムと組み合わせた総合的な都市エネルギーシステムを構築することが重要となる。このような視点に立った研究として、横井他<sup>7)</sup>、前田他<sup>8)</sup>は主に建物部門とエネルギー部門に焦点を当てて、都市におけるエネルギー需給や施設整備空間の検討を行っている。また、落合他<sup>9)</sup>は、全国の市区町村における太陽光発電による電力自給自足の潜在的可能性をEV等運輸部門も含めて検討している。これらの研究では、対象地域が街区や都市に限定されており、地域的な太陽光発電の出力の変動はほとんど考慮されていない。また、道路・駐車空間といった交通空間の活用は対象となっていない。

本研究では、首都圏を中心とした地域を対象として、太陽光発電による発電可能量と整備可能空間、季節や天候による供給量の変動を明らかにする。さらに、これに対応する上で必要となる蓄電池の導入量、整備空間量について検討することを目的としている。

## 2. 市区町村別10分間PV発電量の算出

### (1) PV発電量算出の前提条件

地域における太陽光発電(PV)の発電可能量及び出力変動を検討するにあたって、本研究では、東京電力エリアに属する1都8県、393の市区町村を対象に、現状建てられている戸建・集合住宅の屋根面に可能な限りPVパネルを設置した際に、発電可能な最大のPV発電量を市区町村別に算出する。発電量の算出単位は10分間、期間は2014年の1月から12月までの1年間とした。

算出した市区町村別10分間PV発電量をもとに、地域ごとにどの程度の発電可能量が存在し、短期的・長期的にどのような出力変動特性を持つのかを分析する。これにより、今後PVシステムの大量整備が進んだ際の、系統電力に対する負荷増大や、出力変動幅の大幅な増加を想定した検討を行うことが可能となる。さらに、出力の変動に対して適切に対応可能な蓄電池の整備容量を空間的に把握することができる。

また、本研究では現在普及が進んでいる住宅屋根面に加え、ゼロエミッション化に向けたさらなるPVシステムの活用可能性を検討することを目的として、道路空間を活用したPVパネルの設置可能面積についても検討し、住宅と同様に市区町村別10分間発電量を算出する。

### (2) 10分間日射量の推定方法

本研究では、PV発電量を算出するうえで、そのエネルギー源である日射量のデータを用いる。東京電力管内において、全天日射量の観測が行われている気象庁の観測所は6箇所に限られる。地域による発電量の違いを詳細に把握するためには、より多くの地点における日射量のデータが必要となる。そこで本研究では、地域気象観測システム(アメダス)によって観測されている日照時間の観測データ<sup>10)</sup>から、東京電力管内92地点の全天日射量を推定し、それらをもとに各市区町村におけるPV発電量を算出することとした。

#### a) 日照時間から全天日射量を推定する方法

アメダス地点における水平面全天日射量は、板垣他<sup>11)</sup>のモデルを参考に推定した。ここで、不日照時における降水時とは、前後30分の合計降水量が1mm以上の場合としている。

$$I_G = I_0 \cdot K_t$$

ここで、 $I_G$ : 水平面全天日射量、 $I_0$ : 大気外水平面日射量、 $K_t$ : 晴天指数。

- ・日照時 ( $n > 0$ )

$m < 4$  のとき,

$$K_t = 0.3089 - 0.01443m + (0.441 - 0.0447m) \cdot n$$

$m \geq 4$  のとき,

$$K_t = 0.2507 + 0.263n$$

- ・不日照時 ( $n = 0$ )

- ・無降水時

$m < 3.5$  のとき,

$$K_t = 0.223 - 0.0155m$$

$m \geq 3.5$  のとき,

$$K_t = 0.169$$

- ・降水時

$$K_t = 0.100 - 0.006m$$

ここで,  $n$ : 日照時間,  $m$ : エアマス.

ただし, 9時~15時の不日照時において, 前後1時間の合計日照時間が0.2時間以上の場合,

$$I_G = 1.47 \cdot I_0 \cdot K_t$$

とする.

## b) 斜面日射量の推定方法

PVパネルのアレイ面に入射する斜面日射量は, 太陽から斜面に直接入射する直達成分, 天空で散乱した日射による散乱成分, 地表面等で反射した日射による反射成分をそれぞれ推定し, それらを合成することにより求める. そのために, まず水平面における全天日射量を直達成分と散乱成分に分離(直散分離)する必要がある. 水平面全天日射量の直散分離は, 板垣他のモデルを用いて求めた晴天指数およびErbs他<sup>12)</sup>のモデルを用いて, 全天日射量の散乱成分 $I_d$ を以下の推定式から算出した.

$K_t \leq 0.22$  のとき,

$$I_d = (1.0 - 0.09K_t) \cdot I_G$$

$0.22 < K_t \leq 0.80$  のとき,

$$I_d = (0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4) \cdot I_G$$

$K_t > 0.80$  のとき,

$$I_d = 0.165 \cdot I_G$$

また, 全天日射量の直達成分 $I_b$ は,

$$I_b = I_G - I_d$$

となる. 次に, 斜面日射量を構成する3成分を算出する. まず, 直達成分 $I_{T,b}$ については, 角度変換による直接法を用いて以下の式から算出した.

$$I_{T,b} = I_b \cdot \frac{\cos \theta}{\cos Z}$$

ここで,  $\theta$ : 直達光の入射角,  $Z$ : 太陽天頂角.

散乱成分 $I_{T,d}$ については, 天空放射輝度分布の不均一性を考慮した Perez 他<sup>13)</sup>のモデルを用いて次の式から算出した.

$$I_{T,d} = I_d \cdot \left( (1 - F_1) \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} + F_1 \cdot \frac{a}{b} + F_2 \cdot \sin \beta \right)$$

$$a = \max(0, \cos \theta), \quad b = \max(0.087, \cos Z)$$

ここで,  $F_1$ : 準直達日射係数,  $F_2$ : 地平線散乱日射係数,  $\beta$ : 傾斜角.

反射成分 $I_{T,r}$ については, 斜面近傍の地表面等によって反射した日射が完全拡散すると仮定した均一反射モデルを用いて算出した.

$$I_{T,r} = I_G \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

以上の方法によって算出した斜面日射量の各成分を合成し, 斜面日射量 $I_T$ が以下の式によって算出される.

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d} + I_{T,r}$$

## (2) 設置可能面積の算出方法

戸建・集合住宅屋根面および道路空間において, 現状の都市形態を考慮したうえで, 設置可能な箇所すべてに PV パネルを設置すると仮定して, 面積の算出を行った.

### a) 戸建・集合住宅屋根面の設置可能面積の算出

市区町村別の戸建・集合住宅屋根面を利用した設置可能面積の算出に際し, 本研究では, まず市区町村ごとに戸建住宅の総建築面積ならびに集合住宅の総延べ面積を算出し, それらに対する PV パネルの設置可能な面積の割合を示す設置係数を乗ずることで, 設置可能面積を推計した.

総建築面積および総延べ面積については, 平成 25 年住宅・土地統計調査<sup>14)</sup>の市区町村別住宅数及び 1 住宅当たりの建築面積・延べ面積のデータを用いて算出した. 設置係数については, 環境省の平成 25 年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書<sup>15)</sup>を参考に, 戸建住宅については建築面積に対する設置係数を都県別に設定し(東京都:

0.47), 集合住宅については延べ面積に対する設置係数を一律で 0.13 とした。

#### b) 道路空間の設置面積の算出

道路空間を利用した PV パネルの設置面積の算出に当たっては、まず、住友電気工業の拡張版全国デジタル道路地図データベース<sup>16)</sup>の基本道路リンクデータから、一般都道府県道以上の規格の道路で、かつ人口集中地区に含まれない道路リンクを抽出し、その道路総延長を市区町村別に集計した。それらの道路について、そのうちの 30% に設置幅 2m で PV パネルが設置されるものと仮定して、設置面積の算出を行った。

### (3) 10分間PV発電量の算出方法

東京電力エリアにおいて、アメダス観測地点は 92 地点に限られており、市区町村ごとにどの観測地点のデータを用いるかを決定する必要がある。本研究では、市区町村の重心位置から最近隣に存在するアメダス観測地点のデータを用いて推定した斜面日射量をその市区町村の斜面日射量として扱うこととした。10 分間 PV 発電量は、山田他<sup>17)</sup>の手法を参考に、以下の式から算出した。

$$E(t) = I_T(t) \cdot S \cdot \eta \cdot K_{pt} \cdot K$$

ここで、 $E(t)$ : 時間  $t$  における 10 分間 PV 発電量,  
 $I_T(t)$ : 時間  $t$  における斜面日射量,  $S$ : 設置可能面積,  
 $K_{pt}$ : 月別の温度補正係数,  $K$ : その他のシステム補正係数(= 0.8)。

PV パネルの設置に関して、戸建住宅に対しては、関東地方の一般的な屋根勾配を考慮して、真南向きに傾斜角 20 度に設置することとした。集合住宅については、多くが平坦な屋根であることを考慮して、年間で最も発電量を得られやすい傾斜角 30 度で真南に設置することとした。道路空間については、設置方法が様々に考えられるが、本研究では最も設置しやすい状況である平坦な空間に設置されることを想定して、真南に 30 度で設置されるものとした。また、PV パネルの変換効率については、現状一般家庭などに流通している単結晶シリコン型 PV パネルの設置を想定して、20% として推定を行った。

## 3. 分析結果

### (1) PV 発電量の長期的・空間的特性

PV 発電量の長期的な変動特性を把握するため、算出した市区町村別 10 分間 PV 発電量を東電エリア全域で日別に集計した。1 年間における日別発電量

の推移を図-1 に示す。日別では天候の影響により、年間を通して発電量の変動が大きく見られた。連続する日における変動幅は最大で約 8 倍程度であり、特に日射が平年程度に得られていた 3-5 月で最も極端な変動がみられた。一方で、日中の時間が最も長くなる 6-7 月ごろは梅雨や台風などの影響で十分な日射が得られず、発電量としては 10 月ごろと同程度の水準となっている。一方、変動という点では、7-8 月に十分な日照が得られないような日においても、散乱光によって発電がおこなわれており、比較的極端な変動は少ないという結果となった。しかし、夏季に十分に日射が得られる年においては、より極端な変動が生じる可能性もあるため、より長期的な検討が必要であるといえる。

次に、PV 発電量の空間的な特性を把握するために、市区町村ごとに年間の発電量を集計し、それらを面積で除した単位面積当たりの年間発電量を用いて空間的な発電可能量の把握を行った。結果を図-2 に示す。東京都心の戸建・集合住宅の多いエリアで発電量が多くなり、都市部において発電可能量が大きいことが示された。

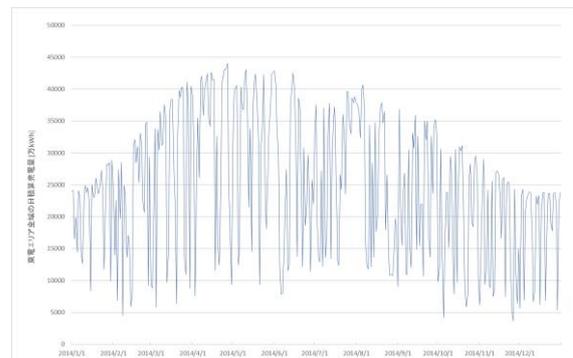


図-1 東電エリア内の2014年一年間の日別発電量

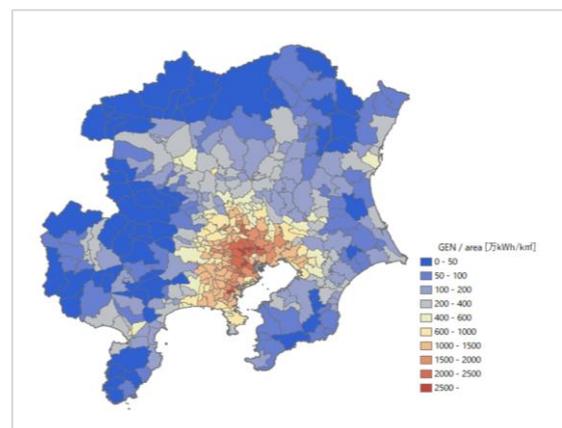


図-2 単位面積当たり年間発電量の地理的分布

## (2) 短期的なPV発電量・変動特性

短期的な PV 発電量とその変動について、広域的な PV 整備によるならし効果の影響を把握することを目的として、PV 出力変動の大きい結果となった 4 月 6 日の日中の 10 分間 PV 発電量を抽出し、東電エリア全域を 18 分割した各地域ごと、および東電エリア全域で集計した発電量の推移を図-3、図-4 に示す。

地域別では、設置可能面積の多い東京、埼玉南部、神奈川東部、千葉北西部などで発電量が大幅に変動することが示された。大幅な変動が発生するタイミングは、比較的近い距離にある地域だとしても、1 時間ほどずれることもあり、またある地域で大幅な減少が発生したときに、別の地域では発電量がピークを迎えるなど、比較的狭い範囲でも変動に差異があることが明らかになった。

一方で、これを東電エリア全域で集計した場合、東京や神奈川東部地域でみられるような極端な変動は、変動が起きる時間のずれや、ほかの地域における変動との相殺によって、全体では比較的なだらかな変動となるという結果となった。このことから、ならし効果が出力変動の抑制に対して一定の効果があることが示された。

## (3) 蓄電池の導入量・整備空間に関する検討

最後に簡単に、ゼロエミッション化を目的として、PV 発電量の一部を蓄電池に蓄電する場合を検討する。蓄電池の設置場所として駐車場を考える。一般的な昼夜間電力消費量の比 7:3 より、本研究の PV 発電量を割り振ると、平均的に夜間用に 7400 万 kWh を蓄電する必要が生じる。EV 用蓄電池を重量制限値まで駐車場に設置する、すなわち 280kWh/スペースを想定すると、260,000 台のスペースが必要となる。一方、研究対象地域（除く静岡県）における都市計画駐車場と附置義務駐車施設の総スペースは 1,400,000 台であり、260,000 台はその 19%となる。日射量の少ない日に備えて平均よりも蓄電量を増やす必要がある一方、都市計画駐車場と附置義務駐車施設以外のスペースの活用、自動運転普及時における駐車スペースの余剰も考慮すべき点であり、今後精査が必要である。

## 4. おわりに

本研究では、首都圏を中心とした地域を対象として、太陽光発電による発電可能量と整備可能空間、季節や天候による供給量の変動を示した。また、こ

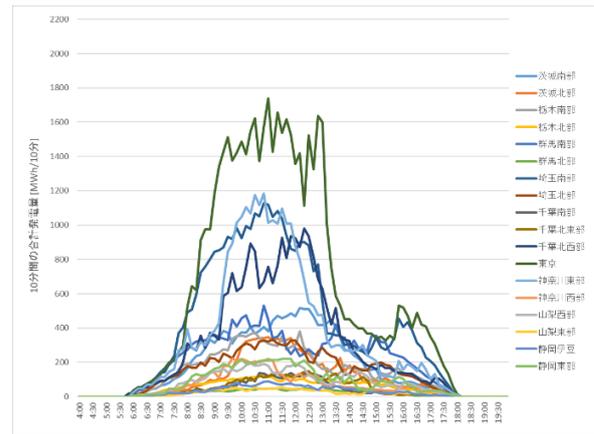


図-3 2014年4月6日のエリア別発電量の推移

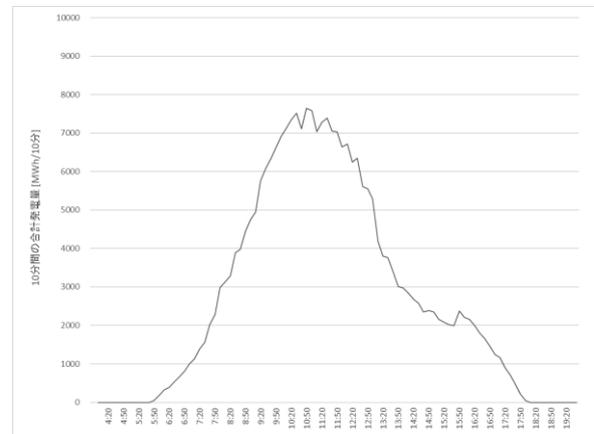


図-4 2014年4月6日の東電エリア全域の発電量の推移

れに対応する上で必要となる蓄電池の導入量、整備空間量について検討した。太陽光パネルの設置場所、送電ネットワークの考慮、蓄電池の設置場所に関する検討などが主な今後の課題である。

**謝辞：**本研究におけるアメダスデータの利用に関して、気象庁気象研究所の川瀬宏明様に貴重なご支援を賜った。末筆ながら謹んで深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 大関崇・高島工・大谷謙仁・菱川善博・輿水源太郎・内田恵久・萩本和彦, 太陽光発電の広域的ならし効果に関する分析・評価, 電気学会論文誌B, Vol.130, No.5, pp.491-500, 2010.
- 2) 名古屋洋之・駒見慎太郎・萩本和彦, 相互平滑化効果を考慮した太陽光発電大量導入時の出力変動想定の一手法, 電気学会論文誌C, Vol.131, No.10 pp.1688-1696, 2011.

- 3) 加藤丈佳・熊沢伸介・本田信行・小相澤政和・西野慎一・鈴置保雄, 観測地点周辺の平滑化効果を考慮した中部全域における空間平均日射変動特性, 電気学会論文誌B, Vol.133, No.4, pp.373-382, 2012.
- 4) 駒見慎太郎・定塚剛, RE出力変動の均し効果における遷移周期に影響する諸要因, 電気学会論文誌B, Vol.138, No.8, pp710-715, 2018.
- 5) Solomon, A.A., Faiman, D., Meron, G., Properties and uses of storage for enhancing the grid penetration of very large photovoltaic systems, Energy Policy, Volume 38, Issue 9, pp.5208-5222, 2010.
- 6) Solomon, A.A., Kammen, D.M., Callaway, D., The role of large-scale energy storage design and dispatch in the power grid: A study of very high grid penetration of variable renewable resources, Energy Policy, Volume 38, Issue 9, pp.5208-5222, 2010.
- 7) 横井隆志・山本祐吾・東海明宏・盛岡通, 低炭素都市の形成に向けた街区更新およびエネルギー計画の統合を支援するシステム開発, 土木学会論文集G Vol.66, No.1, pp.17-34, 2010.
- 8) 前田秀人・中久保豊彦・東海明宏, 低炭素都市の実現に向けた都市計画と省エネルギー計画の統合マネジメントモデルの開発, 土木学会論文集G (環境), Vol. 68, No. 1, pp.21-38, 2012.
- 9) 落合淳太・中川喜夫・松橋啓介・谷口守, 全国の市区町村における太陽光発電による電力自給自足の潜在的可能性—居住地でのスマートグリッド導入を踏まえ—, 土木学会論文集G (環境), Vol.69, No.6 (環境システム研究論文集 第41 巻), pp.II\_217-II\_225, 2013.
- 10) 気象庁: 気象過去データ, 地域気象観測 (アメダス) 10分値データ (2014年)
- 11) 板垣昭彦・岡村晴美・飯田秀重・山田雅信・佐々木律子, 日照時間を用いた時間積算日射量推定モデルの開発, 太陽エネルギー, Vol.32, No.5, pp.61-67,2013.
- 12) D.G.Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, Solar Energy, Vol.28, No.4, pp.293-302, 1982.
- 13) R. R. Perez, P. Ineichen, E.L. Maxwell, R.D. Seals and A. Zelenka : Dynamic Global to Direct Conversion Models, ASHRAE Transactions Research Series, pp.154-168, 1992.
- 14) 総務省統計局: 平成25年住宅・土地統計調査, 2017.
- 15) 環境省ホームページ, 平成25年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書, <http://www.env.go.jp/earth/report/h26-05/index.html>
- 16) 住友電気工業株式会社: 拡張版全国道路地図データベース(平成25年10月版), 2013.
- 17) 山田興一・小宮山宏, 太陽光発電工学—太陽電池の基礎からシステム評価まで, 日経BP社, 2002.

(2019.10.04受付)