

都市内街区における太陽光発電を用いた ゼロエミッション化の可能性

三宅 勇太郎¹・室町 泰徳²

¹学生会員 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)

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

²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)

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

我が国は約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。これに向けて、太陽光発電(PV)を中心とする再生可能エネルギーの長期安定的な主力電源化を目指し、再エネ設備の導入が推進されている。本研究では、住宅用PV大量導入時を想定して、複数の小地域についてPV発電可能量及びエネルギー需要量との差分で算出される余剰・不足電力量の推計を行い、それらの総量や変動特性が小地域ごとにどのように異なるのかを特に都市形態に着目して比較分析した。分析の結果から、低層住宅地域では蓄電池等を用いた夏季のピークシフトの有効性が高いこと、余剰・不足電力量の総量は延床面積率に、変動は建築面積率に影響を受けることを示した。

Key Words: zero emission, photovoltaics, area

1. はじめに

我が国は約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。これに向けて、太陽光発電(PV)を中心とする再生可能エネルギーの長期安定的な主力電源化を目指し、再エネ設備の導入が推進されている。PVは季節、天候、周辺環境等による出力変動が大きく、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。

本研究では、住宅用PV大量導入時を想定して、都市地域の建物や地形によって生じる日射遮蔽の影響を考慮したPV発電可能量を時間別で推計し、建物の配置や高さ、建築面積、延床面積といった都市形態指標が年間のPV発電可能量及び時間別出力変動特性に及ぼす影響を分析する。さらに、都市地域における住宅の時間別エネルギー需要とPV発電可能量の差分をとることで、PV電力の自家消費を前提とした地域別の余剰・不足電力を算出し、都市形態特性によってその総量や変動にどのような違いが生じるのかを明らかにすることを目的としてい

る。

2. 既往の研究

PVの大量整備における都市計画的見地からの検討として、坂村他¹⁾は、地上設置型のメガソーラーを対象に、それらの分布や立地特性について分析したうえで、事業者や自治体の方針・管理方法を比較している。しかし、この研究はメガソーラーの立地について都市計画区分や従前土地利用の観点からマクロ的に把握したものであり、都市ごとの発電特性といったミクロな観点からの分析は行われていない。都市地域のPV発電可能性と都市形態との関係について扱った研究として、Mohajeri et al.²⁾は、都市地域で得られる日射量と都市のコンパクトさを表す変数との関係を分析し、PVパネルの設置可能面積に都市のコンパクトさが影響を与えることを明らかにしている。ただし、都市地域ごとに利用可能な発電量や、エネルギー需要を考慮した検討は行われていない。また、広域的なPVの出力変動に関する研究として、大関他³⁾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。しかし、周辺建物や地形の影響を考慮したミクروسケールでの出力変動については扱われていない。さらに、今後PVの更なる大量導入を進めていくうえでは、エネルギー需給の変動を把握し、蓄電池・EV等の電力貯蔵技術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。横井他⁴⁾は主に建物部門とエネルギー部門に点を当てて、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⁵⁾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、都市形態による日射遮蔽の影響を考慮したPVの出力変動はほとんど考慮されていない。

3. 使用データの概要

本研究では、天候による日射量の時間的変動、及び都市形態や地形による日射遮蔽を考慮し、都市地域における住宅屋根面を最大限利用した際のPVによる時間別発電可能量を推計する。また、PV発電可能量と住宅エネルギー需要量との差分によって算出される時間別余剰・不足電力量を住宅個別で推計する。国勢調査における小地域(町丁・字等)単位でこれらの推計データを集計し、PV発電可能量及び余剰・不足電力量の年間・季節別総量、及び長期的・短期的変動性指標を算出する。そして、小地域ごとの物理的な都市形態特性を表す定量的指標がPV発電可能量及び余剰・不足電力量とその時間的変動特性に与える影響を比較分析によって明らかにする。

まず、建物による日射遮蔽を考慮した日射量の推計、及び住宅個別のPV発電可能量及びエネルギー需要量の推計を行うにあたり、建物の高さ、面積、用途等の情報を含むデータが必要となる。本研究では、ゼンリン社の建物ポイントデータ及び国土院が発行する基盤地図情報に収録される建築物ポリゴンデータを用いて、建物データとして整備した。

また、本研究では、都市の物理的形態に着目して分析を行う。特に、建物の垂直・水平分布、建物の密度、及び道路空間に関する定量的指標を小地域ごとに算出する。分析で用いる都市形態指標を表-1に示す。

推計に関する前提条件としては、既存の戸建・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発電量を推計する。また、エネルギー需要量の推計にあたっては、各住宅のPV電力によって可能な限りすべてのエネルギーを賄うことを想定し、すべての住宅をオール電化住宅とみなして推計を行うこととした。PV発電可能量及びエネルギー需要量の推計は1時間ごととした。

住宅個別で詳細なPV発電可能量の推計を行う上では、

表-1 分析に用いる都市形態指標

建物の垂直分布に関する指標	① 建物高さの平均
	② 建物高さの標準偏差
建物の水平分布に関する指標	③ 平均最近隣建物間距離
	④ 建蔽率 (総建築面積/小地域面積)
建物の密度に関する指標	⑤ 容積率 (総延床面積/小地域面積)
	⑥ 建物密度 (総建物数/小地域面積)

天候による日射量の時間的変動と、都市形態や地形によって日射が遮られることによる建物地点の日射量の差異を同時に考慮することが重要である。本研究では、建物地点ごとの日射量を推定するにあたって、日別日照率に応じた推定手法を使い分けることで、両者の影響を考慮することとした。

日照が十分に得られる晴天日において、得られる日射量は太陽軌道に基づいて概ね計算可能であり、加えて周辺建物や地形による直達日射の遮蔽の影響を考慮に入れた推定を行うことが必要である。日別日照率0.8以上の日については、太陽軌道から周辺建物の高さ及び地形による日射遮蔽を考慮した日射量を解析する日射シミュレーションを地理情報システム(GIS)上で実行し、住宅屋根面のPVパネルに入射する斜面日射量を推定した。

一方で、雲によって日射が遮られ日照が十分に得られない時間が多い日については、地点ごとに得られる日射量の推定は困難である。そのため、日別日照率0.8未満の場合、最近傍のアメダス地点で観測された時間別日照時間をもとに推定を行う。大関他⁶⁾の提案手法を参考に、太陽高度、日照の有無、降水の有無に応じて推定モデルを使い分け水平面全天日射量の推定を行った。さらに、日別日照率が0.2未満の曇天・雨天等の際に推定モデルの精度が低下することを考慮し、アメダス地点から最近隣に位置する地上気象観測所において観測された全天日射量の値をアメダス地点における推定水平面全天日射量とした。推定したアメダス地点の水平面全天日射量からPVパネルの傾斜角・方位角を考慮した斜面日射量を推定する。水平面全天日射量から直達日射量および散乱日射量を求めるにあたってはEbs⁷⁾の直散分離モデルを、斜面日射量を求めるにあたってはPerez⁸⁾の推定モデルをそれぞれ用いた。

以上で示した日別日照率別の推定手法を用いて、屋根面のPVパネルに入射する年間の時別斜面日射量を住宅ごとに推定した。推定フローを図-1に示す。

次に、各住宅のPVパネルの設置可能面積の推計を行う。各住宅の建築面積に対してPVパネルの設置可能な面積比率を表す設置係数を乗じることで設置可能面積を推計する。設置係数は、経済産業省及び環境省の調査報告を参考に、戸建住宅については0.47、集合住宅につい

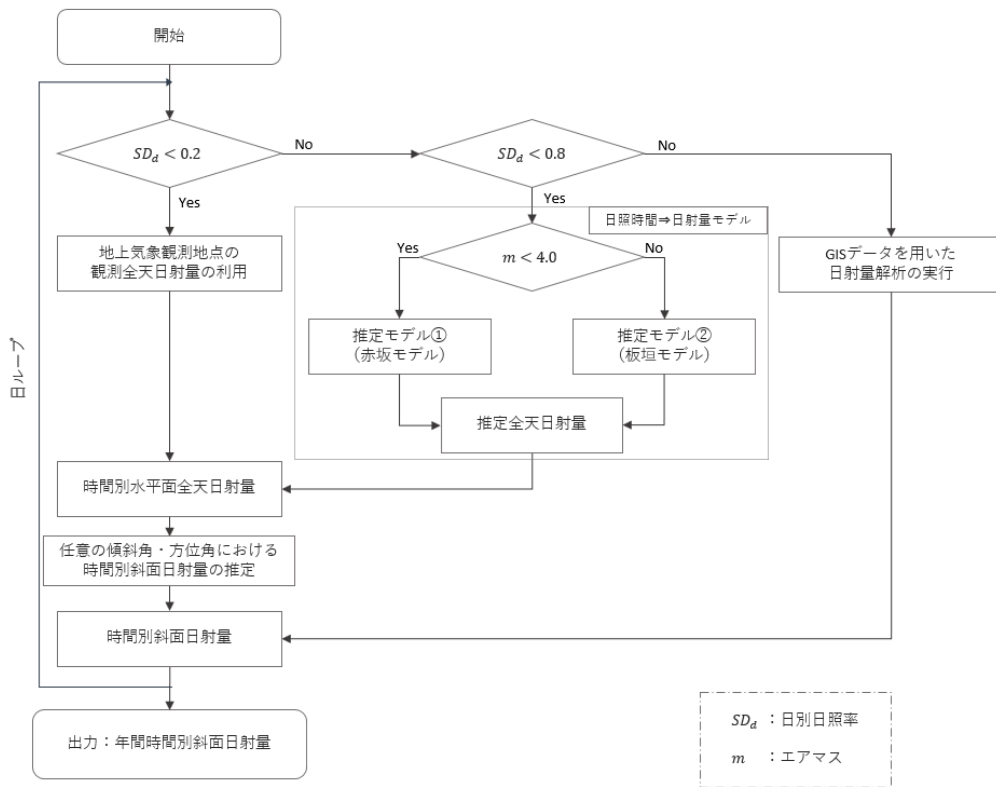


図-1 建物地点日射量の推定フロー

ては0.4とした。各住宅の建築面積は、建物データの値を用いた。

以上で推計した時間別斜面日射量及び設置可能面積をもとに、時間別PV発電量を以下の式から推計した。

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

ここで、 $E(t)$ ：時間 t における時間別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、 η ：PVパネルの発電効率、 K_{pt} ：月別温度補正係数、 K ：その他のシステム補正係数。

PVパネルはすべての住宅で真南方向に関東地方の最適傾斜角である30度で設置されるものとする。PVパネルの変換効率については、現状一般家庭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、19%とした。

各住宅の時間別エネルギー需要量の推計を行うため、住宅用途建物における年間に対する月別エネルギー負荷パターン及び各月の一日内の標準的な時間別エネルギー負荷パターンを用いて、年間の時間別エネルギー需要パターンを作成した。これに、年間の床面積当たりエネルギー消費原単位を乗ずることで、年間の床面積当たり時間別エネルギー需要量を推計した。ここで、エネルギー消費原単位については、家庭部門の世帯当たり用途別エネルギー消費原単位の2017年の統計値を用いた。具体的には、統計値における給湯・暖房・厨房用途のエネルギ

ーを、すべて都市ガスを利用して消費したものとみなし、これらの用途についてオール電化住宅で利用されている電化製品へ転換した際の標準的なエネルギー消費原単位を推計した。このオール電化住宅におけるエネルギー消費原単位を1住宅当たりの平均延床面積の統計値で除した値を用いている。各建物の延床面積は建物データの建築面積に階数を乗じて算出し、これを床面積当たりの需要量に乗ずることで、建物ごとの時間別エネルギー需要量を推計した。各建物の時間別PV発電可能量と時間別エネルギー需要量の差分をとり、時間別余剰・不足電力を算出した。

4. ケーススタディ

以上の推計手法を用いて、横浜市港北区の低層住宅地域2地域及び中高層住宅地域2地域の計4地域におけるPV発電可能量及び余剰・不足電力量を推計し、その総量及び変動特性と都市形態指標との関係について分析を行った。推計期間は2017年の1月から12月までの1年間とした。対象とした4地域の詳細及び各地域の都市形態指標を表-2に示す。

まず、小地域別に集計したPV発電可能量の年間総量および小地域面積当たりの値を表-3に示す。単位面積当たりのPV発電可能量の比較では、低層地域①が年間を通して最も多く発電が可能であり、中高層地域②が最も

少なくなる結果となった。また、低層地域②と中高層地域①が通年でほぼ同程度の発電可能量となった。都市形態指標との対応では、特に建築面積率の影響が大きい。これは建築面積が増加するに従いPVパネルの設置可能面積が増加するためである。

次に、PV発電可能量と住宅エネルギー需要量との差分をとった時間別の余剰・不足電力量を、余剰電量と不足電力に分けて日別に集計し、年間の変動について小地域別に比較分析を行った。この結果、低層の2地域と中高層の2地域では総量及び変動についてそれぞれ同様の傾向を示すことが分かった。低層地域①及び中高層地域①の単位面積当たり余剰・不足電力の日別推移の結果を図-2に示す。全体的な傾向としては、冬季は不足電力が増加、余剰電力が減少し、夏季は不足電力が減少、余剰電力が増加傾向にある。低層地域では5, 6, 7, 9月において、余剰電力量が不足電力量を上回る、すなわち一日の電力を100%賅うことができる日が多く存在しており、このような低層住宅地で蓄電池等を用いた夏季のピークシフトの有効性が高いことが示唆された。一方で、中高層地域では年間を通して余剰電力量が不足電力量を下回っており、このような地域では電力の自給自足は困難であると考えられる。

最後に、小地域別の単位面積当たり余剰・不足電力量の1時間ごとの変動性の比較を行うため、夏季と冬季から十分な日射が得られた晴天日一日をそれぞれ抽出した。結果を図-3に示す。総量に着目すると、低層地域の方が中高層地域と比較して余剰量が多く発生している様子が見て取れる。これは、低層地域と比較して中高層地域の延床面積率が大きく、消費電力が大きくなるためである

表-2 ケーススタディの対象地域及び都市形態指標

小地域分類	低層地域①	低層地域②	中高層地域①	中高層地域②	
町丁名称	篠原北1丁目	新吉田東6丁目	日吉本町3丁目	大倉山1丁目	
総面積(m ²)	161,218	236,794	225,628	171,593	
建物総数	787	1153	662	395	
戸建住宅数	590	979	429	176	
集合住宅数	118	93	161	115	
都市形態指標	平均建物階数	2.13	2.01	2.41	2.63
	建物階数の標準偏差	0.42	0.17	0.85	1.10
	建築面積率	35.15%	31.55%	33.62%	30.90%
	延床面積率	77.36%	69.54%	115.41%	117.64%
	建物密度(棟/ha)	48.82	48.69	29.34	23.02
	平均最近隣距離比率	1.119	1.249	0.896	0.970

表-3 小地域別年間PV発電可能量

	低層地域①	低層地域②	中高層地域①	中高層地域②
総PV発電可能量 [kWh]	5,154,464	6,509,474	6,373,139	3,653,499
1ha当たり発電可能量 [kWh/ha]	319,721	274,900	282,424	212,917

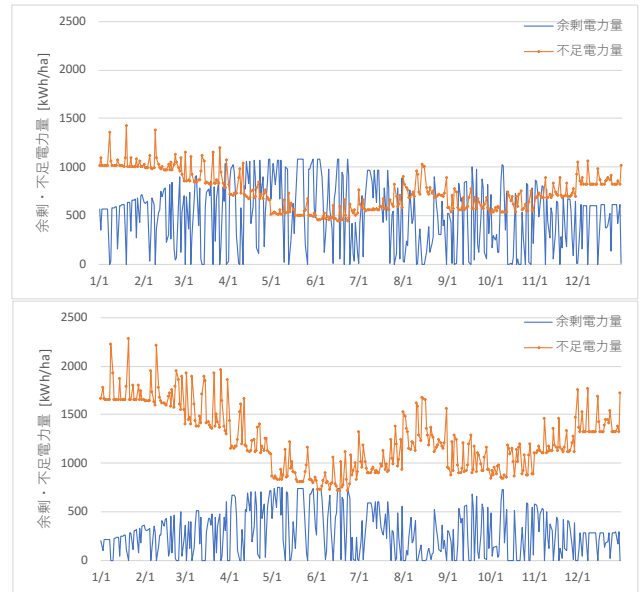


図-2 単位面積当たり余剰・不足電力量の日別推移 (上:低層①, 下:中高層①)

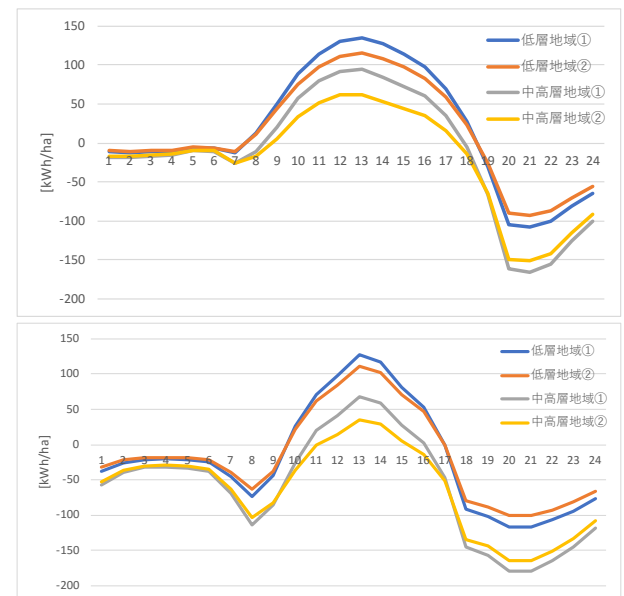


図-3 小地域別単位面積当たり余剰・不足電力量の日内比較(上:7月13日(夏季), 下:1月7日(冬季))

と考えられる。一方で、低層地域ごと、中高層地域ごとと比較すると、低層②と比較して低層①の方が一日内における変動幅が大きく、また中高層①についても中高層②と比較して同様の傾向が見て取れる。このことから、建築面積率が大きくなり、PVパネルの設置面積が大きくなることで、特に朝方・夕方における増減が極端になる傾向が示された。

以上の分析の結果から、特に建築面積率と延床面積率が余剰・不足電力量の総量や変動に影響を与えることが明らかとなり、都市形態がPV大量導入時に一定の影響を及ぼすことが示された。本研究の知見は、災害時にお

けるエネルギーの柔軟な利用計画や、蓄電池や EV と組み合わせにより効率的なエネルギーの利用方法の検討において、都市形態という観点から検討を行うことの有用性を示唆していると考えられる。そのほかの都市形態指標からは PV 発電可能量や余剰・不足電力量に顕著な影響は見られなかったが、建物の方位や屋根形状等を考慮に入れた場合にそれらの指標の影響が表れる可能性があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、住宅用 PV 大量導入時を想定して、複数の小地域について PV 発電可能量及びエネルギー需要量との差分で算出される余剰・不足電力量の推計を行い、それらの総量や変動特性が小地域ごとにどのように異なるのかを特に都市形態に着目して比較分析した。分析の結果から、低層住宅地域では蓄電池等を用いた夏季のピークシフトの有効性が高いこと、余剰・不足電力量の総量は延床面積率に、変動は建築面積率に影響を受けることを示した。

参考文献

- 1) 坂村圭・金子貴俊・沼田麻美子・中井検裕, 地上設置型メガソーラーの建設地の立地特性に関する研究, 都市計画論文集, Vol.49, No.3, pp.633-638, 2014.
- 2) N.Mohajeri, G.Upadhyay, A.Gudmundsson, D.Assouline, J.Kampf, J.L.Scartezzini. "Effects of urban compactness on solar energy potential" *Renewable Energy*, Vol.117, pp.251-265, 2017.
- 3) 大関崇・高島工・大谷謙仁・菱川善博・興水源太郎・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.
- 4) 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.
- 5) 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, pp.II_217-II_225, 2013.
- 6) 大関崇・井澤敏泰・大谷謙仁・黒川浩助, 太陽光発電システムの評価に関する日射量の推定方法, 電気学会論文誌 B, Vol.125, No.1, pp.118-126, 2005.
- 7) Erbs, D.G., S.A.Klein, 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.
- 8) Perez, R., R.Seals, P.Ineichen, R.Estimation and R.Stewart, "Modeling Daylight Availability and Irradiance Model for Tilted Surfaces" *Solar Energy*, Vol.44, No.5, 271-289 1990.

(Received October 2, 2020)