

都市間連携による都市地域の脱炭素化の可能性

室町 泰徳¹・加藤 純大²・川崎 直哉³

¹正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

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

²非会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

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

³非会員 元東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

2021 年 4 月の気候サミットにより日本は 2030 年に向けて大幅な CO₂ 排出量削減が求められることとなった。CO₂ 排出量の主要な部門として、運輸部門、家庭部門、業務その他部門があり、それらが密度高く立地している都市において、いかに脱炭素化を図るかが重要な課題となっている。本研究では、太陽光発電などの再生可能エネルギー、電気自動車、蓄電池システムなどを活用して、各都市単独で脱炭素化を図った場合と都市間連携により図った場合の費用の相違などを検討し、都市間連携による都市地域の脱炭素化の可能性を検討した。結果として、都市間連携を図った方が低費用で脱炭素化が図られ、その効果は連携する都市の特徴に左右されることが示唆された。また、費用削減効果は連携都市間で異なり、メリットの都市間分配に関して課題があることがわかった。

Key Words: CO₂, inter-urban cooperation, electric vehicle, photovoltaics

1. はじめに

2021 年 4 月の気候サミットにより日本は 2030 年に向けて大幅な CO₂ 排出量削減が求められることとなった。CO₂ 排出量の主要な部門として、運輸部門、家庭部門、業務その他部門があり、それらが密度高く立地している都市において、いかに脱炭素化を図るかが重要な課題の 1 つとなっている。一方、環境省¹⁾によれば、約 450 の地方自治体、人口規模では 1 億 1 千万人程度がゼロカーボンシティを宣言している。2050 年カーボンニュートラル達成のためには、太陽光発電 (PV) などの分散型エネルギーや電気自動車 (EV) の大量供給が必要であることから、地方自治体のイニシアティブは極めて重要である。しかし、各都市のゼロエミッション化を具体的にどう進めるか、自治体が参考にすべき地球温暖化対策計画策定のための情報はあまり多くはない。本研究は、国レベルのトップダウンのゼロエミッション化計画と共に、地方自治体レベルのボトムアップの計画に大きく寄与することのできる計画策定ツールを開発することを目的としている。また、本研究では、各都市単独で脱炭素化を図った場合と都市間連携により脱炭素化を図った場合の費用の相違などを検討し、都市間連携による都市地域の脱炭素化の可能性を検討する。

2. 既往研究

近年、スマートグリッドや V2G に関連し、EV の充放電制御システムについての研究が活発に行われている。例えば、池上ら²⁾は 5 種類の EV 充電制御手法による EV 充電負荷を算出、発電燃料費低減効果の評価を行った。環境性の変化や EV の放電を考慮したものとして Eser et al.³⁾があり、中欧 7 か国のエネルギーシステムに焦点を当て、2030 年の EV 充放電の影響を予測している。

都市を対象とし、EV バッテリーの充放電を活用した低炭素化に関する研究も行われている。谷口ら⁴⁾、落合ら⁵⁾は、全国の住宅街区や市区町村を対象に、EV バッテリーの充放電や PV の活用可能性と対象の適性に関する検討を行っている。また、一井ら⁶⁾は、同様な枠組みで住宅街区のグリッド直流化の効果を検討している。河合ら⁷⁾は、高蔵寺ニュータウンを対象に、都市空間構造や居住者のライフスタイルも考慮に含めた低炭素化と防災性の検討を行っている。しかし、これらの研究の一部では、PV のエネルギー供給とエネルギー需要パターンを個別限定的に設定しており、EV バッテリーの充放電による需給調整を検討する上では限界がある。

Kobashi et al.⁸⁾、Kobashi et al.⁹⁾は、日本の複数の都市を対象に、PV、EV、定置用蓄電池の導入に関して技術経済分析を行い、PV のみのシステムに比べ、PV と EV の組

み合わせが経済性・環境性をより改善することを明らかにし、その際の CO₂排出量の削減効果を示した。これらの研究では、PV の電力供給と電力需要パターンを 2018 年 (8,760 時間) の 1 時間ごとに設定しているが、後者は大手電力会社の供給パターンから推定して得ている。したがって、主に住宅において消費される家庭部門と業務その他部門の電力需要を分離することができず、都市における各部門の特徴を反映する上で限界がある。

川崎ら¹⁰⁾は茨城県つくば市を対象に、電力需要を PV および EV と定置用蓄電池の充放電によって賄い、都市をゼロエミッション化する可能性を検討している。また、PV の電力供給と電力需要パターンを 2014 年 (8,760 時間) の 1 時間ごとに設定し、家庭部門と業務その他部門の電力需要は 2014 年の HEMS (Home Energy Management System)、BEMS (Building Energy Management System) データなどを活用して与えている。さらに、EV バッテリーの充放電場所を車庫 (家庭) と共に、駐車場 (業務) においても可能としている。

以上、これまでの既往研究では、都市に一定量の EV、PV、定置用蓄電池が導入された際の影響については少なからず検討されているが、複数の都市の都市間連携による脱炭素化の可能性を議論している例はほとんど見られない。

3. 手法と利用データ

(1) 運輸部門のエネルギー需要の設定

本研究では、平日・休日のサンプル数が豊富な 2005 年道路交通センサスオーナーインタビュー調査を用い、軽乗用車・乗用車・軽貨物車・小型貨物車の 4 車種が EV に転換可能として、車種ごとに電費をそれぞれ 9, 7, 8, 5km/kWh、バッテリー容量を 15, 60, 15, 40kWh と設定した。これらは、車種ごとに既存の EV 車両の仕様を参考に、標準的と考えられる値として設定した。これらの積である航続距離を、1 日の走行距離が平日・休日とも下回る車両が EV に転換するとした。なお、EV に転換しても平日・休日ごとの自動車の利用パターンは 1 年を通して変化しないと仮定した。また、転換費用は車両価格を通じてユーザーが交通費用として負担するものとしている。

(2) 家庭・業務その他部門のエネルギー需要の設定

本研究では、将来において、家庭部門、業務部門のエネルギー消費がすべて電化されることを想定し、現状で電化されている電力需要と、非電化のエネルギー需要を推計し、それらの和を電力需要とした。また、需要家分布と延べ床面積あたりの電力消費パターンを算出し、そ

れらに乗ることによって市区町村別に 2014 年の電力需要を 1 時間ごと (計 8,760 時間) に推計した。したがって、1 時間以内の需要変動は考慮することができない。

まず、家庭部門の需要家分布は、2010 年国勢調査の建て方別世帯数と世帯あたり平均延べ床面積の乗算により求めた延べ床面積の総和とした。

延べ床面積あたり電力需要パターンは、2014 年時点で電化されている需要と非電化の需要、冷暖房需要と冷暖房以外の需要の四区分で推計した。まず、電化されている冷暖房需要は、2014 年の気温変化に応じて暖房は 10°C、冷房は 24°C を閾値として冷暖房の運転を行うこととして電力需要パターンを推計した¹¹⁾。電化されている冷暖房以外の需要は、HEMS が導入された一都三県 66 世帯の 2014 年の時間別電力消費量計測データ¹²⁾の該当部分を用い、延べ床面積あたりの電力需要パターンを推計した。また、非電化の暖房需要は、電化されている暖房需要と同様に推計した。非電化の暖房以外の需要は、天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル¹³⁾によるエネルギー需要パターンを用いて設定した。この部分は、2014 年を反映した推計ではなく、今後の課題である。以上の需要パターンを、都道府県別エネルギー消費統計のエネルギー別需要総量、およびエネルギー・経済統計要覧¹⁴⁾の四区分の構成比 (全国) と整合するようにスケーリングした上で、非電化の需要をエネルギーベースで電力需要に変換した。

次に、業務部門の需要家分布は、2013 年法人土地・建物調査の都道府県別従業者数と総延べ床面積を用いて従業者 1 人あたり延べ床面積を算出し、これと業種別従業者数の乗算により求めた延べ床面積の総和とした。

延べ床面積あたり電力需要パターンの推計は、概ね家庭部門と同様であることから、家庭部門と異なる部分に関して述べる。電化されている冷暖房需要に関して、業種によっては夜間に冷暖房が用いられないことを反映し、天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル¹³⁾により冷暖房需要が 0 となる時間帯の需要は 0 とした。また、電化されている冷暖房以外の需要に関して、「平成 23 年度エネルギー管理システム導入促進事業費補助金 (BEMS)」において計測された関東地方 176 棟の事業所における 2014 年の時間別電力消費量データの該当部分を用い、業種別に延べ床面積あたりの電力消費パターンを推計した。この業種別の電力消費パターンにより、オフィスや商業施設など、異なる業種間の電力消費量の違いを表現した。

(3) PV 発電量の設定

PV 発電量は、気象庁の観測地点における水平面全日射量のデータを用いて推計した。なお、本研究では、PV 設置の傾斜角を 30°、方位角を 0° (真南方向) と

している。具体的には、NEDO 標準気象データベースにおける推計方法¹⁵⁾を用い、2014 年の時間別水平面全天日射量のデータから、斜面日射量の直達成分、散乱成分、反射成分の合算によって斜面日射量を推計した。まず、水平面全天日射量を直達成分と散乱成分に分ける直散分離を、Erbs et al.¹⁶⁾のモデルを用いて行った。これを基に斜面日射量の算出には、Perez et al.¹⁷⁾モデルを用いた。これらのモデルは国内外で確立された手法として認知されている。斜面日射量を用いた単位 PV 容量あたり発電量の推計には、JIS C 8907、JIS C 8907 附属書 3 を参考とした時間別の発電量推計手法である岸田ら¹⁸⁾の手法を用いている。

(4) 都市のゼロエミッション化の費用最小化問題

都市のゼロエミッション化の費用最小化問題については川崎ら¹⁰⁾による定式化を参考としている。定式化の概要としては、PV と定置用蓄電池の導入費用とこれらの維持管理費用、都市外の電力供給会社との売買電収入・費用を 25 年間 (PV の耐用年数) 積算した全体費用の最小化問題と捉える。制約条件は、EV と定置用蓄電池の容量制約と出力制約、蓄電池の充放電を含む電力需給の一致制約などである。結果として、ゼロエミッション化に必要な PV、定置用蓄電池などの設備導入容量や総費用が算出される。

4. 分析結果

(1) 一都三県とこれに含まれる都市の分析結果

図-1 は、都市外の電力供給会社からの買電が無い場合 (シナリオ 0) とある場合 (シナリオ 1) について、一都三県で費用最小化を行った場合、一都三県に含まれるいくつかの都市に関して費用最小化を行った場合の電力単価と買電率を示したものである。電力単価は一都三県が現況の 3 倍、業務中心都市の千代田区では 4 倍近くとなり、非常に高価となっている。柏市では一都三県より約 4% 高く、吉川市は約 14% 低くなっている。千代田区は従業者数が多い一方、吉川市は人口や従業者数が少なく、これらが電力単価の差として表れている。これらの傾向は買電のあるシナリオ 1 においても、電力単価、買電率に関してある程度確認することができるが、電力単価の差は縮小している。

一都三県でゼロエミッション化を行った場合、千代田区はメリットがあり、吉川市はメリットが無いという状況となり、メリットのある都市から無い都市に対してメリットの一部移転が無ければ、都市間連携によるゼロエミッション化は進まない可能性がある。

(2) 複数都市の連携による効果

次に、より小規模な複数都市の都市間連携による効果の分析として、柏市とこれに隣接する都市である松戸市、流山市について、それぞれ単独で都市のゼロエミッション化を行った場合と 3 都市一体となった場合の総費用及び買電量を図-2 に示す。

その結果、都市外の電力供給会社からの買電が無い場合 (シナリオ 0) では約 8.8%、ある場合 (シナリオ 1) では約 0.56% の総費用削減につながる事がわかった。さらにシナリオ 1 における買電量は約 2.5% の削減となった。このように、複数都市が都市間連携することによって、総費用や買電量を抑制し、都市のゼロエミッション化の実現可能性は向上すると考えられる。この要因として、電力融通をより広域で行うことができるようになったこと、「ならし効果」によって PV 発電量の変動が軽減されたことなどが考えられる。

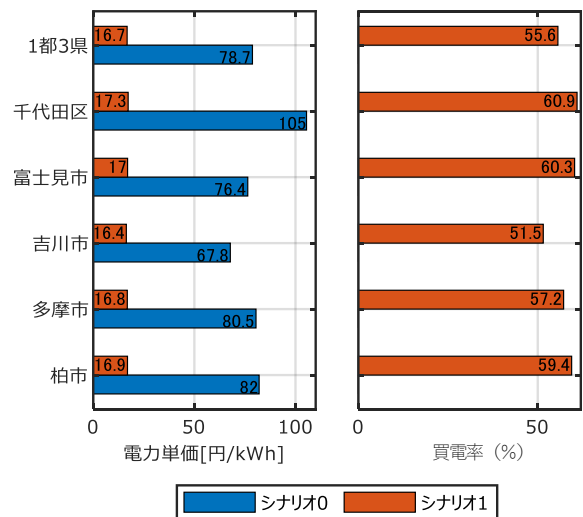


図-1 費用最小化を行った場合の電力単価 (円/kWh) と買電率 (%)

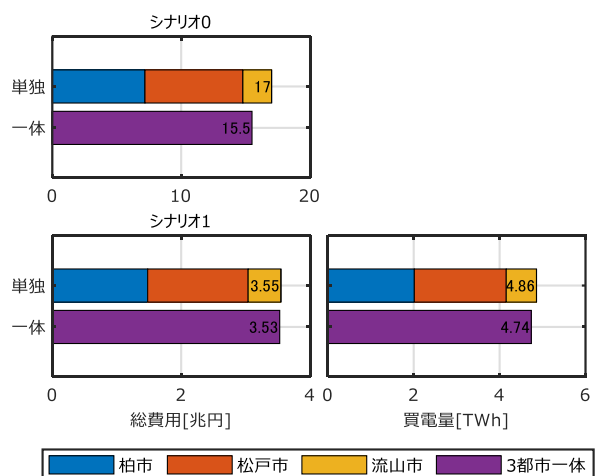


図-2 複数都市の連携による効果

5. 終わりに

本研究では、各都市単独で脱炭素化を図った場合と都市間連携により脱炭素化を図った場合の費用の相違などを検討し、都市間連携による都市地域の脱炭素化の可能性を検討した。その結果、都市間連携を図った方が低費用で脱炭素化が図られ、その効果は連携する都市の特徴に左右されることが示唆された。また、費用削減効果は連携都市間で異なり、メリットの都市間分配に関して課題があることがわかった。

今後の課題としては、どのような複数都市の組み合わせであれば都市間連携のメリットが高まるのか、都市間連携のメリットのある都市から無い都市に対してメリットの一部移転をどのように図るのか、といった点などを明らかにする必要がある。

謝辞

本研究では、国土交通省より道路交通センサス、環境共創イニシアチブよりエネルギー管理システム導入促進事業費補助金（BEMS）のデータをご提供頂きました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省: 2050年二酸化炭素排出実質ゼロ表明自治体, 2021.
- 2) 池上貴志, 矢野仁之, 工藤耕治, 萩本和彦: 負荷平準化による発電燃料費低減を目的とした電気自動車の多数台充電制御効果の評価, 電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.133 No.6 pp.562-574, 2013.
- 3) Eser, P., Chokani, N. and Abhari, R. S.: Impacts of battery electric vehicles on renewable integration within the 2030 European power system, *International Journal of Energy Research*, 42: 4142–4156, 2018.
- 4) 谷口守, 落合淳太: 住宅街区特性から見たスマートグリッド導入適正, 日本不動産学会誌, 第25巻第3号, pp.100-109, 2011.
- 5) 落合淳太, 中川喜夫, 松橋啓介, 谷口守: 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), 69巻, 6号, p. II_217-II_225, 2013.
- 6) 一井啓介, 高原勇, 谷口守: 住宅街区特性を踏まえたスマートグリッド直流化効果の検証, 土木学会論文集 D3, Vol.75 No.6, pp.I_231-I_238, 2020.
- 7) 河合一輝, 加藤博和, 朴秀日, 清水大夢, 秋山 祐樹: 低炭素性と災害時エネルギー供給確保を考慮した街区群更新の評価手法の検討, 土木学会論文集 D3, Vol.75 No.5, pp.I_213-I_222, 2019.
- 8) Kobashi, T., Yoshida, T., Yamagata, Y., Naito, K., Pfenninger, S., Say, K., Takeda, Y., Ahl, A., Yanime, M. and Hara, K.: On the potential of “Photovoltaics + Electric vehicles” for deep decarbonization of Kyoto’s power systems: Techno-economic-social considerations, *Applied Energy*, Volume 275, 115419, 2020.
- 9) Kobashi, T., Jittrapirom, P., Yoshida, T., Hirano, Y., Yamagata, Y.: SolarEV City concept: Building the next urban power and mobility systems, *Environmental Research Letters*, 1748-9326, 2020.
- 10) 川崎直哉, 室町泰徳: 東京都市圏における EV・PV・定置用蓄電システムを活用した都市のゼロエミッション化に関する分析, 都市計画論文集, Vol.56 No.3, 2021.
- 11) 国立天文台: 理科年表, 丸善, 2021.
- 12) GfK: HEMS データ (一都三県), GfK, 2014.
- 13) 柏木孝夫: 天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008, pp.61-69, 日本工業出版, 2008.
- 14) 日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット: 2016 年度版 エネルギー・経済統計要覧, 省エネルギーセンター, 2016.
- 15) NEDO 新エネルギー部 太陽光発電グループ: NEDO 標準気象データベースの解説書, <https://www.nedo.go.jp/content/100778067.pdf>, 2015.
- 16) Erbs, D. G., Klein, S. A. and Duffie, J. A.: Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation, *Solar Energy*, Volume 28, Issue 4, pp. 293-302, 1982.
- 17) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J. and Stewart, R.: Modeling Daylight Availability and Irradiance from Direct and Global Irradiance, *Solar Energy*, Volume 44, No. 5, pp. 271-289, 1990.
- 18) 岸田真一, 三浦尚志, 西澤繁毅: 太陽光発電設備の年間発電量の推計方法に関する調査, 建築研究資料 No.188 号, 国立研究開発法人建築研究所, 2018.

(2021.10.1 受付)

THE POSSIBILITY OF CARBON NEUTRALIZATION BY INTERCITY COOPERATION

Yasunori MUROMACHI, Jundai KATO and Naoya KAWASAKI

During the Climate Summit in April 2021, Japan promised to significantly reduce CO₂ emissions toward 2030. The major sectors of CO₂ emissions are the transportation, household, and business and other sectors, and how to decarbonize them is an important issue in cities where they are densely located. In this study, we examined the difference in cost between decarbonization in each city alone and cooperation between cities by utilizing renewable energy system composed of solar power generation, electric vehicles, storage battery systems, etc. Then, we examined the possibility of decarbonization of urban areas through intercity cooperation. As a result, it was suggested that decarbonization could be achieved at a lower cost by coordinating between cities, and the effect depends on the characteristics of the cooperating cities. In addition, it was found that the cost reduction effect differs between partner cities, and there is a problem regarding the distribution of merits between cities.