

再エネ活用に向けた スマートグリッド直流化効果の検証

一井 啓介¹・高原 勇²・谷口 守³

¹学生非会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail:s1820438@s.tsukuba.ac.jp

²非会員 筑波大学特命教授 未来社会工学開発研究センター センター長
(〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail: takahara@sk.tsukuba.ac.jp

³正会員 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail:mamoru@sk.tsukuba.ac.jp

近年、低炭素社会の実現に向けた取組が多く行われており、その中でスマートグリッドなど、都市内で電力の効率利用を図る取組がある。一方、スマートグリッドの重要な要素である家庭用太陽光発電や EV に利用される電力は直流であり、現在の電力網に利用される交流電力に変換する過程でロスが発生してしまうが、この点に着目してスマートグリッドの効果を検証した研究蓄積はない。そこで本研究では、スマートグリッドの普及を仮定した全国の住宅街区を対象とし、変換ロス等を考慮した電力需給からシナリオ別に電力ロス量と電力自給率を求めることで、直流化効果を分析した。その結果、1)直流化によって電力自給率が最大で 6.3%向上すること、2)自動車のトリップ距離が長く、戸建住宅の占める割合が大きい住宅街区ほど直流化効果が大きいことなどが示された。

Key Words : smart grid, DC, conversion loss, self-sufficiency, PV, EV

1. はじめに

近年、低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの導入が加速しており、固定買取価格制度の導入にも後押しされ、太陽光発電を主とする再生可能エネルギーの設備容量が大幅に増加している¹⁾。一方、九州などの日射条件が多い地域では、発電量に対して電力需要が不足し、太陽光発電など自然変動電源の出力制限が実施される事態が生じており、現在の集中電源に依存した電力供給システムから脱却し、分散型電源を活用する重要性が高まっている。

分散型電源を活用する取組として、我が国では、IT を活用して電力の需給を自動制御するシステムであるスマートグリッドの導入について検討が重ねられてきた²⁾。スマートグリッドでは、太陽光発電や蓄電池、EV など需要家側に導入される分散型のエネルギーリソースを活用することで、効率的に再生可能エネルギーを活用することができる。例えば既存研究³⁾では、郊外の自動車保有が多い市区町村において、最大で 83%の電力の地産地消が可能であることが示されている。

しかし、スマートグリッドの重要な構成要素である太陽光発電や EV は直流電力を利用している。一方で、現在の電力供給システムや家庭内で利用されている電力は交流電力であるため、太陽光発電や EV の電力を家庭や送電網に給電する場合、直流電力から交流電力に変換する必要が生じる。この電力を変換する過程ではロスが生じてしまうため、交流電力を利用するスマートグリッドの場合、変換ロスの発生によって再生可能エネルギーが十分に活用できない可能性がある。

一方で、近年では直流電力を活用し、再生可能エネルギーや直流電力を利用するデータセンターなどの設備に対して、効率的な電力供給を行おうとする取組も行われている⁴⁾。このように、再生可能エネルギーを有効に活用する手段として直流電力の活用が期待されており、スマートグリッドについても、直流化することによって再生可能エネルギーを有効活用できる可能性が高い。

ここで既存研究を見ると、スマートグリッドの導入効果については、全国の住宅街区(以下、「街区」)を対象としてスマートグリッド導入による電力融通効果を分析した研究⁵⁾をはじめ、技術革新による太陽光発電や EV

の性能向上がスマートグリッドの導入適性に与える影響を分析した研究⁹⁾や、EVの代わりに燃料電池自動車を導入し、水素社会におけるスマートグリッド導入の効果を分析した研究⁷⁾があるが、スマートグリッド内部で生じる電力の変換ロス⁸⁾を考慮し、直流電力の活用について検討した研究は行われていない。

また、直流電力の活用については、再生可能エネルギーの自家消費に必要な蓄電池容量に関して、直流給電方式が優位となる領域を検証した研究⁸⁾や、住宅へ直流給電システムを導入した場合の導入効果を検証した研究⁹⁾などがあるが、街区全体を直流化した場合の効果について検証した研究は行われていない。

以上を踏まえ、本研究では全国の街区を対象とし、スマートグリッド内部で生じる変換ロス⁸⁾を考慮した上で、街区内の電力需給状況を把握する。その上で、街区内で生じる電力ロス量と電力自給率について、交流電力を利用したスマートグリッドを導入した場合と、直流化したスマートグリッドを導入した場合で比較することで、スマートグリッドの直流化効果を分析する。更に、直流化効果と街区特性の関係について見ることで、スマートグリッドの直流化に適した街区の特徴を明らかにする。

2. 使用データと分析対象街区

(1) 使用データ

本研究では、全国の様々な街区における住民の暮らし方や交通行動を考慮して分析を行うため、平成 27 年全国都市交通特性調査を使用データとして選定した。この調査は都市の基礎的な交通特性を把握するとともに、全国の都市の交通特性を横断的、時系列的に比較分析し、今後の都市交通政策の展開方向を検討するための基礎資料を得る目的で実施されている交通調査である。

また、本研究では全国の様々な街区を対象とし、その街区特性にまで着目した分析を行うため、既存研究¹⁰⁾で提案されている住宅地タイプについても使用データとして選定した。この住宅地タイプは、全国都市交通特性調査で対象とされる街区について、居住者の自動車利用行動や人口密度、世帯属性、土地利用規制などの情報に基づき町丁目単位で分類した、135の街区群である。

(2) 分析対象街区の概要

本研究では、全国都市交通特性調査で対象とされている街区のうち、住宅地タイプの設定に用いられている街区のみを対象としている。更にこれらの街区から、既存研究を参考に、圏域特性、土地利用規制、人口密度、駅からの距離を因子とした実験計画法によって 23 の街区を選定した。選定した分析対象街区の一覧を表-1に示す。

表-1 分析対象地区一覧

| 街区名 | 圏域特性 | 土地利用規制 | 人口密度 | 駅距離 |
|---------|---|-----------------|-------------|-----|
| I 低1 | I 大都市圏中心都市 (政令指定都市あるいは人口100万人以上の都市) | 低層住宅専用地域90%~ | - | - |
| I 低2 | | 低層住宅専用地域60~90% | - | 遠 |
| I 中高1 | | 中高層住宅専用地域90%~ | - | - |
| I 中高2 | | 中高層住宅専用地域90%~ | - | - |
| I 中高3 | | 中高層住宅専用地域90%~ | - | - |
| I 住 | | 住居地域60%~ | 150人/ha~ | - |
| I 調 | | 市街地調整区域25~50% | - | - |
| II 低1 | II 大都市圏衛星都市 (三大都市圏に属する都市かつ中心都市の条件を満たさない都市) | 低層住宅専用地域90%~ | ~100人/ha | 遠 |
| II 低2 | | 低層住宅専用地域90%~ | 100人/ha~ | - |
| II 中高 | | 中高層住宅専用地域90%~ | - | 近 |
| II 住 | | 住居地域60%~ | 100人/ha~ | - |
| II 調 | | 市街地調整区域25~50% | 50人/ha~ | - |
| III 低 | III 地方中心都市 (県庁所在地あるいは人口15万人以上の都市) | 低層住宅専用地域60~90% | 100人/ha~ | - |
| III 中高1 | | 中高層住宅専用地域60~90% | 50~100人/ha | 遠 |
| III 中高2 | | 中高層住宅専用地域60~90% | ~50人/ha | - |
| III 住 | | 住居系混在 | 50人/ha~ | - |
| III 商 | | 商業地域60%~ | 50~100人/ha | 近 |
| III 調 | | 市街地調整区域50~75% | ~50人/ha | 遠 |
| IV 低 | IV 地方都市 (三大都市圏以外の都市かつ中心都市の条件を満たさない都市) | 低層住宅専用地域60~90% | 50人/ha~ | - |
| IV 中高 | | 中高層住宅専用地域60~90% | ~50人/ha | - |
| IV 住 | | 住居系混在 | 50人/ha~ | - |
| IV 商 | | 商業地域60%~ | 50人/ha~ | - |
| IV 調 | | | 市街地調整区域75%~ | - |

タイプについては、その都市が属する圏域特性ごとに I ~IV、土地利用規制ごとに低層住宅専用地域は「低」、中高層住宅専用地域は「中高」、住居地域・住宅系混在地域は「住」、商業地域は「商」、市街地調整区域は「調」と表記しており、同じ土地利用規制で他の特性が異なる街区がある場合、それらを区別して I 低 1, I 低 2 のように表記した。また、駅からの距離は、最寄り駅までの距離が 1km 以内の場合は「近」、1km 以上の場合は「遠」と表記しており、表記がない場合はそれらが混在している。ただし、大都市圏中心都市における中高層住宅専用地域が 90% 以上の街区については、街区によって実際に中高層住宅に住む世帯数比にかなりのばらつきが存在することが既存研究¹⁰⁾で明らかにされている。このため、本研究では I 中高についてのみ、更に3段(I 中高 1~ I 中高 3)に分けて検討を行っている。具体的には、中高層住居に居住する世帯の割合がそれぞれ 80%未滿, 80%以上 90%未滿, 90%以上となるように 1~3 に分類している。

3. 分析方法

(1) 想定する街区の概要

本研究では、スマートグリッドが導入され、各家庭に太陽光パネル及び EV が普及している状態の街区を想定し、街区内の電力需給状況を把握していく。街区内の各家庭にはスマートメーターが設置され、電力需給をリアルタイムで把握することが可能となるため、街区内の電力網(グリッド)を通じて電力をやり取りすることが可能であると想定している。また、EV が十分に普及してお

り、各家庭に存在する自動車、軽自動車は全て EV に置き換わった状態を想定する。ただし、EV の走行距離に対して充電時間が十分に取れない場合についてのみ、EV には置き換わらないものとしている。

各家庭では太陽光パネル、EV との間で電力がやり取りされ、そこで生じる余剰・不足分について、グリッドを通じて他の家庭と電力をやり取りする。更に、グリッド内の電力が不足する場合には、グリッド外から外部電力の供給を受けることが可能であると想定する。このとき、電力をやり取りする際に直流電力・交流電力間の変換ロスや変圧ロス、送電ロスなどが生じる。これらの電力ロスについて、太陽光パネルから家庭への送電過程で生じる電力ロスを L_1 、家庭から EV および EV から家庭への送電過程で生じる電力ロスを L_2 、外部電力がグリッドへ送電される際に生じる電力ロスを L_3 とし、これらを考慮した電力需給状況をシナリオごとに把握することで、直流化効果を明らかにする。具体的には、a)交流電力を利用したスマートグリッド(AC グリッド)が普及した状態、b)AC グリッドかつ、太陽光パネルから EV への給電に関してのみ、直流電力を直接給電可能な状態、c)直流電力を利用したスマートグリッド(DC グリッド)かつ、家庭内で消費される電力は交流電力である状態、d)DC グリッドが普及した状態の 4 つのシナリオを設定し、それぞれの条件ごとに街区内で生じる電力ロス量および電力自給率を算出することで、スマートグリッドの直流化効果を明らかにする。これらの電力ロスを踏まえた街区内の電力需給イメージを図-2に、条件ごとの電力ロスの設定値を表-3に示す。なお、本研究で用いる電力ロスのうち、変換ロスについては家庭内の直流給電に関する既存研究⁹⁾を、送電ロスについては既存調査¹⁰⁾を参考に設定している。

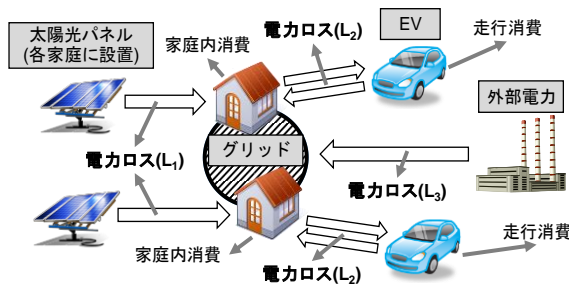


図-2 分析対象街区の電力需給イメージ

表-3 条件別の電力変換ロス値

| 条件 | L1[%] | L2[%] | L3[%] | その他 |
|-----------------|-------|-------|-------|------------------------|
| a)ACグリッド | 7 | 10 | 3.4 | |
| b)ACグリッド+EV給電DC | 7 | 10 | 3.4 | 太陽光パネル→EVの場合のみ電力ロス3.5% |
| c)DCグリッド+家庭内AC | 3.5 | 0 | 13.1 | 家庭内消費に対して電力ロス+3.5% |
| d)DCグリッド | 3.5 | 0 | 13.1 | |

(既存研究⁹⁾、既存調査¹⁰⁾を参考に作成)

(2) 電力需給の算出

街区ごとの電力需給を把握するため、まず各家庭内での電力需給を1分単位で算出する。その算出手順を図-4に示す。更に、各家庭の電力需給を踏まえ、街区全体で生じた不足電力、余剰電力を算出し、街区内で電力をやり取りする。その上で、不足電力がまだ存在する場合、その不足電力量が外部電力からの給電量となる。以上により、街区における電力需給状況を把握することが可能となる。

太陽光発電量の算出に用いる日射量は、NEDOの日射量データベース¹²⁾を参照し、街区に最も近い地点の平均年における年間時別日射量データを用いた。また、街区ごとの気象条件の差異をなくすため、分析対象街区ごとの値を平均した値を分析に用いている。太陽光パネルは全家庭において真南、傾斜 30 度の条件で設置されているものとし、日射量(kWh/m²)×システム出力係数 0.85×パネル容量 4(kW)×日射強度 1(kW/m²)を計算することで太陽光発電量を算出した。ただし、本研究で用いるシステム出力係数については、太陽光パネルで発電した電力を変換・変圧するパワーコンディショナーによる損失分を除いている。更に、集合住宅の場合は、戸建住宅に比べ屋根面積が限られる点を考慮し、既存研究⁷⁾を参考に土地利用規制ごとに集合住宅の階数を設定し、集合住宅の発電量についてはその階数で除することで、発電量の違いを考慮している。

次に、家庭内消費電力量については、1世帯あたりの1日における家庭内消費電力量の全国平均値を用いた。その上で、街区特性や居住者特性を反映させるため、世帯人員別の電気代や世帯の職業構成等を踏まえた時間帯

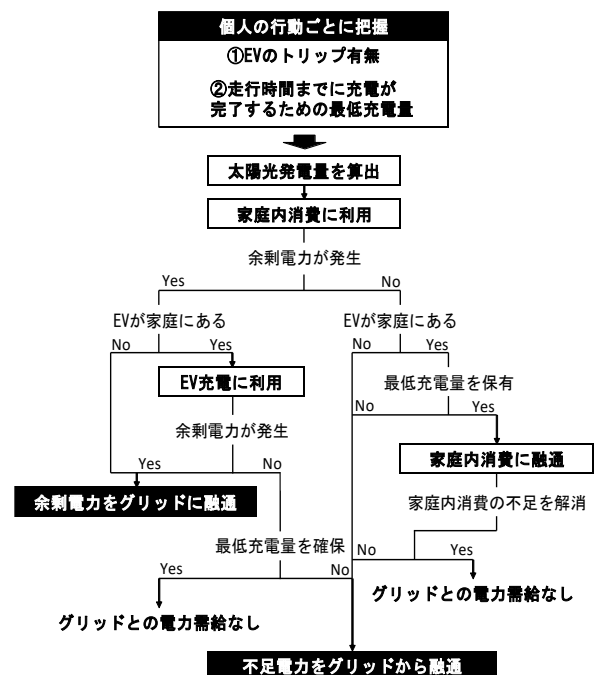


図-4 世帯内における電力需給の算出フロー

ごとの電力消費パターンを設定することで、各特性を考慮した分析を可能としている。

そして、EV の性能については、2018 年モデルの日産リーフ¹³⁾の性能に準拠して設定した。本車種を選定した理由としては、環境省の次世代自動車ガイドブック¹⁴⁾における推奨する用途の項目において、普通乗用車の中で唯一「一般車と同等」と記載されており、また EV から家庭へ給電可能なシステムが既に搭載されていることが挙げられる。なお、本研究ではスマートグリッドが安定的に運用された状態での直流化効果を把握するために、1 日の開始時点で EV には最大容量に対し半量の充電量が確保されている状態で分析を行っている。

(3) 電力自給率の算出

本章 2 節で把握した電力需給より、各街区における電力自給率を算出することが可能となる。本研究において、グリッド内に供給される電力は太陽光パネル、EV、外部電力から供給される電力に限られ、このうち EV から供給される電力量は 1 日の開始時点における初期充電量と 1 日の終了時点における最終充電量の差分をとることで算出することが可能である。つまり、街区 i における電力自給率を R_i とすると、 R_i は以下の式(1)、式(2)で表される。

$$R_i = S_i / (S_i + V_i + O_i) \quad (1)$$

$$V_i = VF_i - VS_i \quad (2)$$

S_i : 太陽光発電量

V_i : EV からの給電量

O_i : 外部電力からの給電量

VF_i : EV の最終充電量

VS_i : EV の初期充電量

また、街区区内における電力の需要と供給は一致するため、以下の式(3)が成り立つ。

$$S_i + V_i + O_i = H_i + VD_i + L_i \quad (3)$$

H_i : 家庭内消費電力量

VD_i : EV 走行消費電力量

L_i : 電力ロス量

ここで、 S_i , H_i , VD_i はシナリオに拠らず固定値である。よって、スマートグリッドの直流化による効果は、電力ロス量の増減によって EV、外部電源からの給電量も変化し、これにより電力自給率にも効果が表れることがわかる。

4. 分析結果

(1) スマートグリッドの直流化効果

街区ごとの直流化による電力自給率の増大効果、および電力ロス量の削減効果について、分析結果をそれぞれ図-5、図-6 に示す。これらの図より、スマートグリッドを直流化する意義についての考察を行う。なお、図中の数値は条件 a)(AC グリッド)から条件 d)(DC グリッド)に変化させた際の変化率を示しており、以降「直流化」とは、条件 a)から条件 d)に変化させることを指す。また、これらの図においては、電力自給率の増大効果が大きかった街区を上から順に並べている。

- 1) 図-5 より、直流化効果が最も大きい街区(図-7)では電力自給率が6.3%程度向上しているのに対し、最も直流化効果が小さい街区(図-8)では 0.1%程度となっており、導入する街区によって直流化効果が大きく異なることがわかった。このことから、スマートグリッドの直流化については、導入する街区の適性を踏まえ十分に検討する必要があるということが明らかになった。
- 2) 図-5、図-6 より、電力自給率の増大効果および電力ロス量の削減効果が最も大きく変化するシナリオは、条件 b)から条件 c)へ変化させたときであることがわかった。つまり、これらの効果に最も大きな影響を

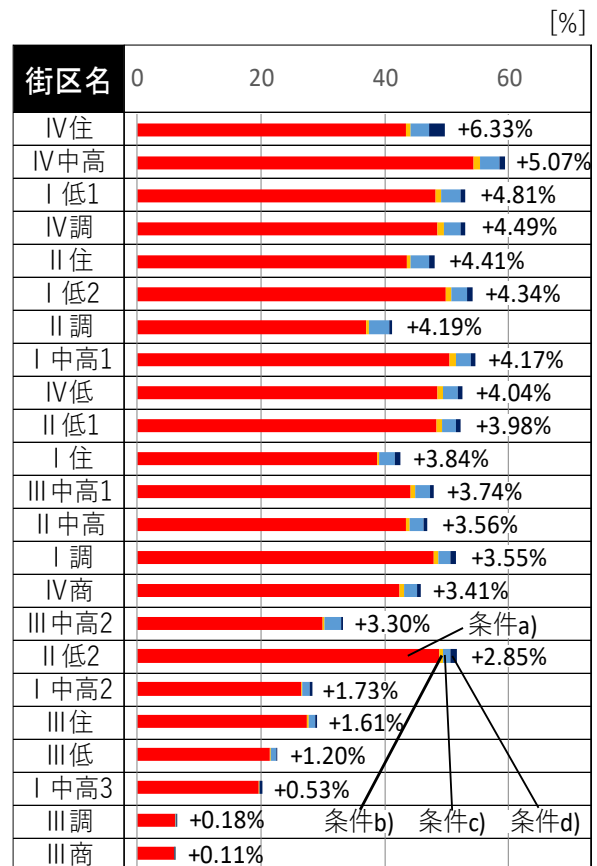


図-5 直流化による電力自給率の増大効果

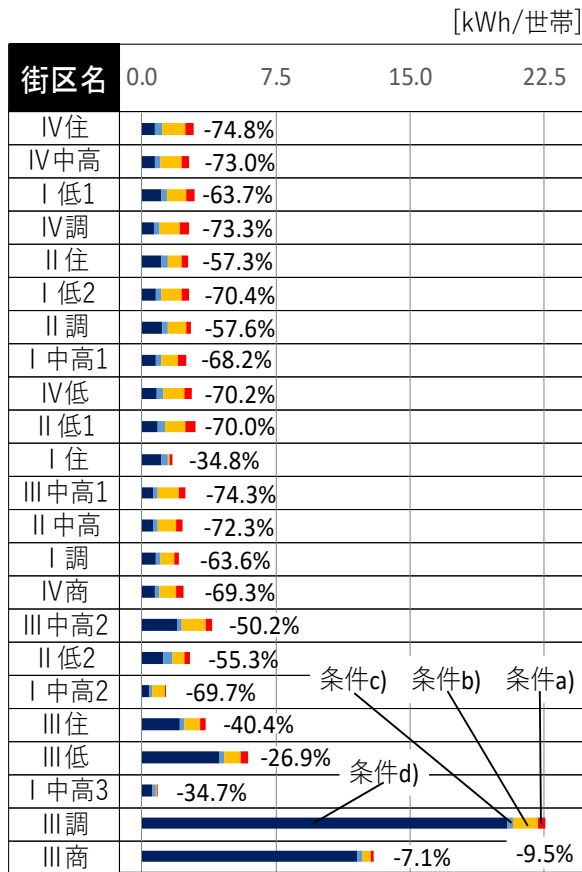


図-6 直流化による電力ロス量の削減効果

果たしている要因は、グリッド自体の直流化であると言える。また、家庭内で使用される電力が交流を維持する場合でも、多くの街区では十分な直流化効果を得られるものの、一部の街区では大きく効果が減少してしまうこともわかった。

- 3) 図-6より、直流化による電力ロス量の削減効果と電力自給率の増大効果の間に直接の相関は見られないことがわかった。このような結果が得られる理由としては以下の点が考えられる。3章3節で示したように、電力ロス量の削減効果は電力自給率 R_i の分母に対してのみ表れる。よって、直流化前の電力自給率が高い街区ほど、電力ロス量の削減による電力自給率の増大効果は大きくなることわかる。例えばI住とI中高3の街区を見ると、電力ロス量の削減率はほぼ等しいものの、直流化前の電力自給率に大きく差があるため、直流化による電力自給率の増大効果にも3.3%程度の差が生じている。

(2) 直流化効果と街区特性の関係

分析対象街区の街区特性を図-9に示し、直流化効果に対してどのような街区特性が影響しているのか、考察を述べる。なお、図-9についても、電力自給率の増大効果が大きかった街区を上から順に並べている。

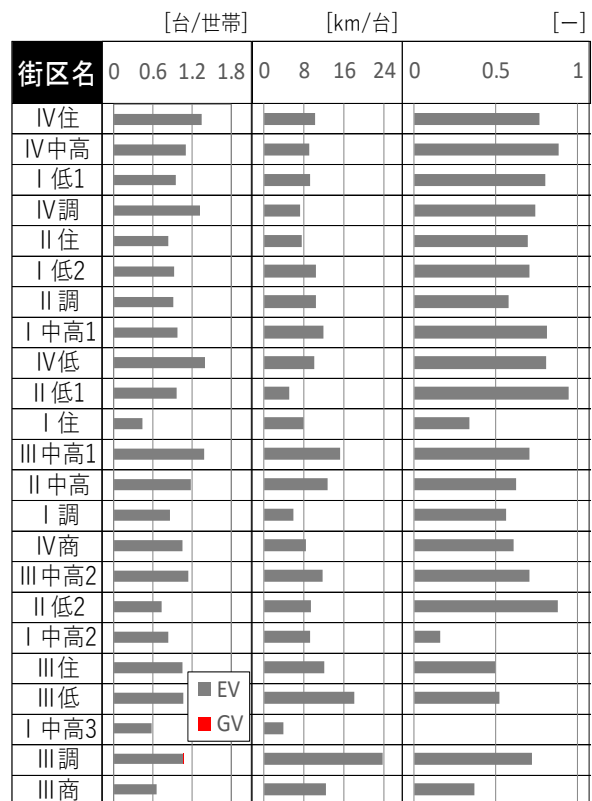
- 1) 図-9より、平均EVトリップ距離が短く、戸建住宅



図-7 直流化効果が最も大きい街区の例



図-8 直流化効果が最も小さい街区の例



保有車両台数 EVトリップ距離 戸建住宅の割合

図-9 分析対象街区の街区特性

- の占める割合が大きい街区ほど、直流化効果が大きいことがわかった。このような結果が得られる理由としては以下の点が挙げられる。まず EV トリップ距離については、1)EV トリップ距離が短いほど走行に必要な電力量が抑えられ、EV と家庭の間で電力のやり取りが増えるため、その間で生じる電力ロス量の削減効果が増大したこと、2)EV と家庭の間で生じる電力ロス量が削減されたことによって、EV からの給電量が抑えられたことが考えられる。次に戸建住宅の占める割合については、戸建住宅は集合住宅に比べ太陽光発電量が大きく、太陽光パネルから住宅への給電量も多くなるため、直流化による電力ロス量の削減効果が増大したことが考えられる。
- 2) 図-9 より、地方中心都市である圏域Ⅲの多くの街区で直流化効果が小さいことがわかった。これは 1)で示した通り、圏域Ⅲの街区における平均 EV トリップ距離が長いことが原因であると考えられる。
- 3) 図-9 より、EV の保有台数と直流化効果の間に相関は見られないことがわかった。また、本研究で用いた EV の性能に基づけば、スマートグリッドを導入した場合に転換不能となる家庭はほぼ皆無であることがわかった。但し、本研究では日常行動のトリップのみを対象としており、1 日の中でトリップが完結しないような長距離トリップについては分析の対象外としていることに留意が必要である。

5. おわりに

本研究の分析結果から、スマートグリッドを直流化した際の効果として、電力自給率が最大で 6.3%向上することがわかった。また、スマートグリッドの直流化効果が得られやすい街区は、EV による平均トリップ距離が短く戸建住宅の占める割合が大きいような街区であり、地方中心都市のように自動車のトリップ距離が長い街区や、大都市圏中心都市の集合住宅が多く立地する街区などにおいては直流化効果が得にくいことがわかった。

なお、本研究ではスマートグリッド直流化の効果を電力ロス量、電力自給率の 2 指標のみで評価したが、電力自給率の向上は、低炭素化や、電力需給を街区内で完結し、外部電源に頼らないマイクログリッドの達成などにも貢献するため、これらの項目についても直流化の効果について把握することで、スマートグリッドの直流化によるメリットをより具体的に把握することが可能となる。

一方、本研究における分析は、住宅地における 1 日間の直流化効果の把握に留まっており、オフィス、工場といった住宅地以外の土地利用や、長期における天候変動については考慮できていない。また、本研究ではスマー

トグリッドの直流化にかかるコストについては扱っておらず、直流化導入の実現性について十分な検討が行えていない。更に EV についても、本研究では EV を家庭に接続し、家庭内の需要にのみ電力を供給する Vehicle-to-Home の状態を前提としており、EV からグリッドへの電力供給を可能とする Vehicle-to-Grid の状態については検討していない。これらの更なる検討事項について考慮した分析を行っていくことが、今後の課題である。

謝辞：本研究は(株)トヨタ自動車との共同研究「これからの社会システムとモビリティのありかた研究」の一環として実施した。また、本研究を進めるにあたり、金沢工業大学の泉井良夫氏に有益な助言をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省：エネルギー白書 2018, <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>, 最終閲覧 2019.2.
- 2) 経済産業省：次世代エネルギー・社会システム協議会, <http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/>, 最終閲覧 2019.2.
- 3) 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—, 環境システム研究論文集, Vol41, pp.217-225, 2013.
- 4) 東京電力ホールディングス：東京電力ホールディングスと NIT の業務提携について～社会的要請に資する協業事業の創出に向けた共同出資会社の設立～, http://www.tepco.co.jp/press/release/2018/1486271_8707.html, 最終閲覧 2019.2.
- 5) 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性, 不動産学会誌, Vol.25, No.3, pp.100-109, 2011.
- 6) 谷口守・落合淳太：住宅街区のスマートグリッド導入適性に技術革新が及ぼす影響, 不動産学会学術講演会論文集, No.28, pp.29-38, 2012.
- 7) 杉本峻佑・谷口守：水素社会における電力地産地消の可能性, -住宅街区でのスマートグリッド導入を踏まえ-, 不動産学会学術講演会論文集, No.33, pp.13-20, 2017.
- 8) 湯浅一史・植嶋美喜・馬場崎忠利：電力エネルギー自家消費率を考慮した直流給電方式の適用優位領域に関する検討, 電気設備学会 論文誌, Vol.38, No.5, pp.30-38, 2018.
- 9) 清水磨美・尹奎英・酒居新治：直流給電システムを用いた建築物エネルギー供給システムの効率化に関する研究 (第 1 報) 直流給電システムの住宅への適用性検討, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, Vol.9, pp.121-124, 2016.

- 10) 中道久美子・谷口守・松中亮治：交通環境負荷低減に向けた都市コンパクト化政策検討のためのデータベース「住区アーカイブ」の構築，土木学会論文集 D，Vol.64，No.3，pp.447-456，2008.
- 11) 東北発 素材技術先導プロジェクト：送電ロスとは・・・，<http://nanoc.imr.tohoku.ac.jp/column.html>，最終閲覧 2019.2.
- 12) NEDO：日射量データベース閲覧システム，<https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html?from=b>，最終閲覧 2019.2.
- 13) 日産：日産リーフ Web カタログ，<https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf.html>，最終閲覧 2019.2.
- 14) 環境省：次世代自動車ガイドブック 2017-2018，<http://www.env.go.jp/air/car/vehicles2017-2018/index.html>，最終閲覧 2019.2.

(2019.*.*受付)