

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651186

研究課題名(和文) ギガソーラーシティを実現する大都市圏構造のあり方

研究課題名(英文) Desirable urban spatial structure for realizing Giga-solar city

研究代表者

加藤 丈佳 (Kato, Takeyoshi)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90283465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：名古屋都市圏を対象として、郊外戸建住宅へのPVS導入の実質的な一次エネルギー消費量の削減効果を算定した。その結果、都心地域並みの住宅密度となるように郊外地域を分散集中化すれば、日常行動における自動車利用が減少し、都心のPVSなしの集合住宅居住と比較して、郊外のPVS付戸建住宅居住の方が省エネとなる範囲が数km拡大することを明らかにした。

また、愛知県内298ヶ所の配電供給エリアを対象とし、電圧上昇に関わる指標としてエリア単位の最大余剰電力および年間余剰電力量を評価した。その結果、系統への影響を緩和の点からは、住宅・業務部門が混在し、電力需要が大きいエリアのPVS導入容量の増加が有効であった。

研究成果の概要(英文)：This study evaluated the substantial energy conservation effect of photovoltaic power generation system (PVS) installed in suburban detached-houses. The difference in both the residential and transport energy consumption by inhabitation area was taken into account. As a result, construction of clustered sub-urban area would be effective for reducing the energy consumption in the household of frequent vehicle utilization, resulting in the practical energy conservation of PVS installation for the household with large family member.

This study evaluated the annual maximum and annual total of surplus electricity supply as a measure of voltage rise due to the high penetration of PVS in 298 distribution substation supply areas in Aichi Prefecture. As a result, the increase of PVS capacity in a complex area of residences and commercial buildings with large electricity demand is effective for mitigating the impact on the electric power system.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：太陽光発電 都市計画 エネルギー 電力システム

1. 研究開始当初の背景

わが国では2030年までに53GWもの太陽光発電システム(以下、PVS)を導入する目標を掲げており、大都市圏におけるPVS導入量はギガワット規模に達することが予想される。一方で、大量導入されたPVS群の出力変動が電力系統に様々な影響を与えることが懸念され、対策として電気自動車や住宅に設置された蓄電池の充放電制御、デマンドレスポンスによる電力需要の制御などが期待されている。

これらの対処療法的な対応に対し、原因療法的な対応として徹底したPVSの分散導入によってPVS群全体の合計出力変動そのものを小さくすることが考えられる。ただし、PVSの設置に適した戸建住宅等を過度に分散することは、「住む」、「働く」、「遊ぶ」といった都市機能を損ないかねない。そこで、人口減少時代を迎えて大都市圏の構造変化が求められる中で、都市機能を損なうことなくPVS大量導入に対応可能な大都市圏のランドデザインを示すことが必要である。

2. 研究の目的

都市域へのPVS群大量導入に関して様々なシナリオを想定し、1) 日常交通行動を考慮した郊外戸建住宅へのPVS導入の実質的一次エネルギー消費量の削減効果、2) 配電系統における電圧上昇の要因となる配電エリア単位の余剰電力を評価し、PVS群の大量導入に適した都市圏構造(戸建住宅や商業施設の分布)のあり方を検討する。

3. 研究の方法

郊外戸建住宅へのPVS導入の実質的一次エネルギー消費量の削減効果については、名古屋都市圏を対象とし、中京都市圏パーソントリップ(PT)調査に基づき、PT集計単位である中ゾーン50地域について世帯構成別に日常生活における交通エネルギー消費量を算定するとともに、先行研究の結果に基づき、居住に関わるエネルギー消費量を算定する。これらの合計値から一次エネルギーに換算PVSからの電力供給量を差し引いた値を実質的一次エネルギー供給量とみなし、PVSなしの都心集合住宅居住との比較により、郊外戸建住宅へのPVS導入による実質的一次エネルギー消費量の削減効果を評価する。

PVS大量導入時における配電供給エリア単位の余剰電力の評価については、愛知県を対象とし、500mメッシュ単位で算定した電力需要からPVS出力を差し引き、残余電力負荷の年間の時間変化を算定する。これを配電変電所の供給エリア単位で集計することで、エリア単位の余剰電力の年間最大値、年間電力量等を評価する。

4. 研究成果

4.1 郊外戸建住宅へのPVS導入の実質的一次エネルギー消費量の削減効果

4.1.1 評価モデルの構築

現状の街区群構成(ケース0)、中京都市圏PT調査における基本ゾーン単位の街区群の分散集中化(ケース1)、中ゾーン単位の街区群の分散集中化(ケース2)を想定し、PVS付きの郊外戸建住宅居住の実質的省エネ性を評価した。図2にケース1および2における郊外地域の分散集中化の概念図を示す。同図(a)~(c)はいずれも大ゾーンが4つの中ゾーンから構成され、各中ゾーンが4つ基本ゾーンから構成された状況を表している。同図(a)の現状の街区群構成に対し、同図(b)では各中ゾーンにおいて基本ゾーン単位で分散集中化して基本ゾーン内の移動距離が短くなった状況を表している。この場合、基本ゾーン間には住宅が存在せず、隣接する基本ゾーン間の移動距離については現状と同じである。同様に、同図(c)では各中ゾーン単位で分散集中化し、基本ゾーン内および基本ゾーン間(中ゾーン内)の移動距離が短くなった状況を表している。

名古屋市中区役所から5km圏内の中ゾーンを都心地域(計9地域)とし、PVSなしの集合住宅にすると想定した。一方、半径5km圏外の中ゾーンを郊外地域(計41地域)とし、PVS付きの戸建住宅に居住すると想定した。各地域について、各世帯に対して外部から供給すべき年間の総一次エネルギー供給量 E [MJ/年]を算定し、都心の9地域における世帯種別の平均値 E_{UA} との比較により、郊外地域にてPVS付き戸建住宅に居住する場合の実質的省エネ性を評価した。

各地域に居住する世帯として、1~6人家族の6種類の世帯を想定した。1人世帯の場合を除いて勤め人は男性1人であり、都心部に電車で通勤するとした。各世帯の住宅延床面積は、戸建住宅および世帯人数4人以下の集合住宅については平成17年国勢調査に基づき想定した。5人以上の集合住宅については、平成20年度住宅土地統計調査に基づき集合住宅居住の世帯人数と畳数との関係および畳数と延床面積との関係を定式化し、4人以下の場合との整合性を考慮し決定した。また、戸建住宅の場合には、延床面積に比例したPVS容量を想定した。

各世帯が上述の中京都市圏50地域にそれぞれ居住すると想定し、世帯別・居住地域別に、居住に関する一次エネルギー消費量 E_R と交通に関する一次エネルギー消費量 E_T との和からPVSからの電力供給量 E_{PV} (一次エネルギーに換算)を差し引いて、各世帯に対して外部から供給すべき年間の総一次エネルギー供給量 E [MJ/年]を算定した。

E_R として、大阪大学下田氏らの研究成果を用いた。 E_{PV} として、設置容量に比例して年間11.8GJ/kW(一次エネルギー換算)の電力が供給されるとした。 E_T として、NHK国民生活時間調査や中京都市圏PT調査等に基づき、目的 i (買物、通院、飲食、通勤)の年間合計移動回数 c_i [回/年]、目的 i 別の移動先区

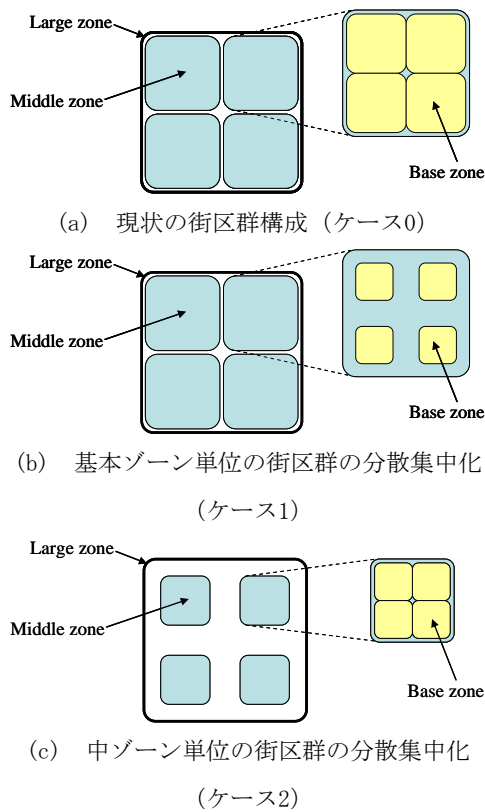


図2 分散集中化型の都市構成の概念図

分 j (基本ゾーン内, 中ゾーン内, 隣接中ゾーン, 大ゾーン内, 隣接大ゾーン) の割合 D_{ij} , 目的 i ・移動先区分 j 別の利用交通機関 k (自動車, バス, 鉄道の分担率) の割合 P_{ijk} , 移動先区分 j 別の移動距離 L_j [km], 交通機関 k 別のエネルギー消費原単位 e_k [MJ/km] を想定し, これらの積算によって算定した.

ケース 1 やケース 2 の様な分散集中化は, 郊外の各地域における住宅密度が都心地域並みに高まった街区群構成を想定していることになる. そこで, 日常生活で利用する店舗などの商業施設の密度も都心地域並に高まると想定し, ケース 1 およびケース 2 について, 郊外の各地域の交通エネルギー消費量 E_j を算定する際, 以下のように想定した.

- ・基本ゾーン内, 中ゾーン内 (ケース 2 のみ) の目的別の移動手段割合 P_{ijk} として, 都心地域の平均値を使用
- ・基本ゾーン内, 中ゾーン内の移動距離 L_j として, 都心地域の平均値を使用

郊外地域について都心地域の P_{ijk} を適用するため, 中京都市圏 PT 調査に関して, 買物, 通院および飲食を目的とする基本ゾーン内および中ゾーン内の移動について, 都心地域および郊外地域の P_{ijk} の平均値を算定した結果, 基本ゾーン内の移動の場合, 郊外地域では買物を目的とする移動の 40% が自動車を利用しているが, 分散集中化して現状の都心地域並みになれば 10% に削減された. 通院や飲食の場合, 削減量はやや小さいものの同様の傾向であった. さらに, ケース 2 において中ゾーン内の移動に関しても郊外地域が都心

地域並になれば, 買物および飲食における自動車利用は半分に削減された.

同様に, 移動距離 L_j についても都心地域および郊外地域の平均値を算定した. その結果, ケース 1 では, 基本ゾーン内の移動距離が現状の平均 3.9km から 1.6km に減少した. これに加えてケース 2 では, 中ゾーン内の移動距離が現状の平均 7.8km から 4.2km に減少した.

4.1.2 評価結果

各地域における世帯への一次エネルギー供給量 E を算定し, 都心 9 地域における E の平均値 E_{UA} からの削減量を算定した. 各世帯がワゴン車 (実効率: 5.56 MJ/km) を使用する場合の結果を図 3 に示す. 現状の街区群構成のケース 0 では, 同図 (a) に示すように, 3 人家族の世帯では都心から十数 km 圏外, 4 人家族以上になると 6~7km 圏外の場合, 交通エネルギーの増加によって PVS を導入しない都心居住の場合よりも一次エネルギー消費量は大きい. これに対して同図 (b) の基本ゾーン単位で街区群が分散集中化するケース 1 では, 例外はあるものの, 3 人家族では都心から 20km 圏内までは PVS なしの都心集合住宅居住よりも PVS 付の郊外戸建住宅居住の方が省エネである. 4 人家族以上の場合も概ね 10km 圏内までなら PVS 付の郊外戸建住宅居住の方が省エネとなる. さらに, 同図 (c) の中ゾーン単位で街区群が分散集中化するケース 2 では, わずかではあるが, PVS 付の郊外戸建住宅居住の方が省エネとなる範囲は, 各世帯においてそれぞれ拡大している.

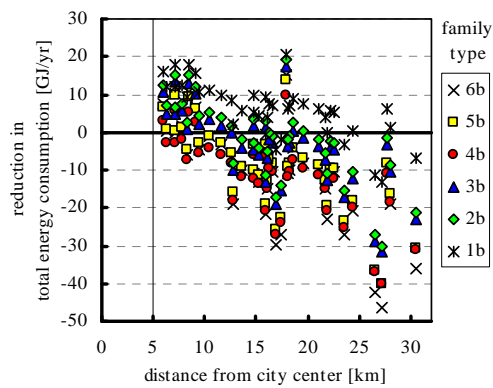
このように, 都心から概ね十数 km 圏内の地域であれば, 徒歩や自転車による買物等の日常行動が可能ないように街区群を分散集中化して自動車利用を削減することで, PVS 付きの戸建住宅居住は PVS なしの都心集合住宅居住よりも省エネになると考えられる. もちろん, 本研究における想定は一例にすぎず, 同じ家族構成の世帯でも評価は異なると考えられる. しかし, 本研究で算定したように, 日常生活に関わる交通エネルギー消費量を考慮しても, 戸建住宅への PVS 導入は実質的な省エネに寄与のであれば, 都市本来の機能を損なうことなく, その効果を最大限に発揮しつつするよう大都市圏のグランドデザインを考える余地があると考えられる.

4.2 配電系統エリア単位の余剰電力

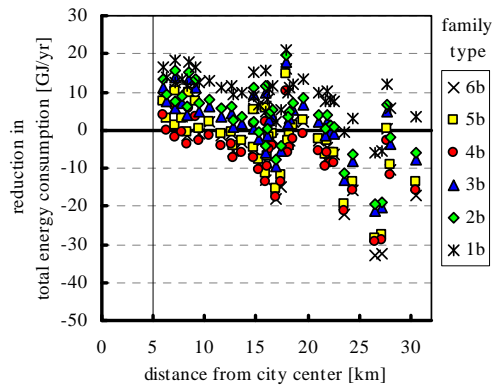
4.2.1 評価モデルの構築

国勢調査および企業統計に関するメッシュ統計データに記載の世帯数や従業員数等から, 気温感応度を考慮して, 500 m 四方のメッシュ i ごとに電灯電力に相当する電力需要の 1 時間値 $D_i(h)$ を算定した. なお, $D_i(h)$ には民生 (家庭・業務) 部門の需要家を考慮されているが, 産業部門の需要家のうち, 電灯電力に含まれる小規模の町工場などは考慮されていない.

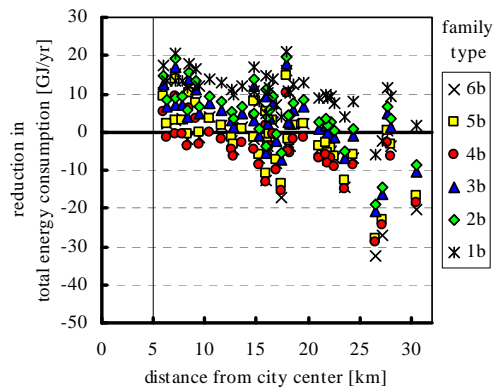
また, メッシュ i における PVS 出力の算定



(a) 現状の街区群構成 (ケース0)



(b) 基本ゾーン単位での街区群の分散集中化 (ケース1)



(c) 中ゾーン単位での街区群の分散集中化 (ケース2)

図3 郊外地域の街区群構成による省エネ性の相違

のため、まず、環境省による 2030 年の全国 PVS 導入見込量 (中位ケース: 67 GW) および各都道府県の PVS 導入ポテンシャルを参考に、愛知県の導入容量をカテゴリー別 (住宅用, 非住宅用) に、それぞれ 1.24 GW, 2.92 GW と算出した。次に、PVS 導入容量の分布として下記の 2 ケースを想定し、メッシュ i の PVS 導入容量 C_i を決定した。
Case-1: 住宅用・非住宅用 PVS とともに、戸建住宅数に比例して導入容量が分布する場合。

Case-2: 住宅用 PVS は戸建住宅数に比例して導入容量が分布し、非住宅用 PVS は戸建住宅および店舗・オフィスビルの床面積が大きいメッシュの導入割合が小さくなるように導入容量が分布する場合。

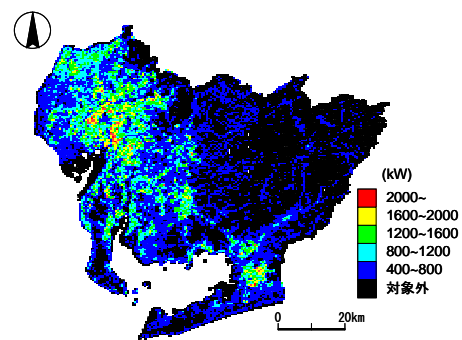
図 4 に各メッシュの PVS 導入容量を示す。Case-1 では、地域による導入容量の差が大きく、名古屋市や周辺の住宅地の導入容量が大きい。Case-2 では、戸建住宅や店舗・オフィスビル等が少ないメッシュへの非住宅用 PVS の導入容量が大きくなる状況を想定しているため、Case-1 と比較して名古屋市内への導入容量が減少し、周辺都市の導入容量が増加している。その結果、導入容量の地域差は Case-1 よりも小さい。

各メッシュの導入容量 C_i に、各メッシュ最近棒の観測点における水平面全天日射量の観測値から算定した傾斜面日射量 $I(h)$ とシステム効率 (一律 80% と想定) を乗じて PVS 出力 $P_{PVi}(h)$ を算定した。

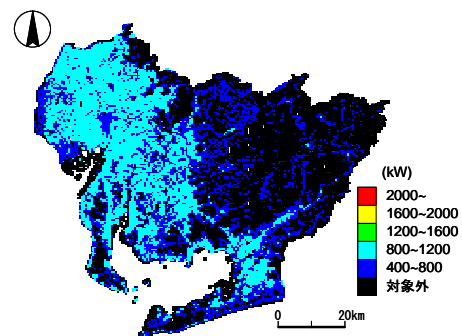
$P_{PVi}(h)$ を $D_i(h)$ から差し引いて系統側からみた残余電力負荷 $L_i(h)$ を算定した。 $L_i(h)$ が負の場合、該当メッシュでは余剰電力が生じているとした。

次に、配電用変電所の供給エリア単位で PVS 導入による残余電力負荷を評価するため、供給エリアを以下のように想定した。

手順 1: 変電所が存在する 500 m メッシュを特定し、対象エリア全体の合計電力需要が最大の日時について、その隣接 8 メッシュの合計電力需要の昇順に変電所を番号付けする。
手順 2: 変電所番号の昇順に、予め設定した周囲メッシュ探索順番に従って、隣接する 1 つのメッシュを供給エリアに加える。ただし、探索したメッシュが他の変電所の供給エリ



(a) Case-1



(b) Case-2

図 4 500m メッシュにおける PVS 導入容量

アとなっていた場合、供給エリアには加えず、次の変電所の想定に移る。

手順 3：予め設定した一変電所の最大供給エリア（変電所の周囲 289 メッシュ（8.5 km 四方））に達するまで手順 2 を繰り返す。ただし、隣接しないメッシュを供給エリアとしてしまうことを避けるため、変電所の供給エリアとなったメッシュ群に隣接する全メッシュが他の変電所の供給エリアとなっていた場合、その変電所に関する追加メッシュ探索を終了する。

上記の手順にしたがって想定した愛知県内 298 ヶ所の配電用変電所の供給エリアを図 5 に示す。大半の供給エリアにおける最大電力需要は一般的な配電用変電所の容量（40MW 程度）の範囲内であり、最大でも電気学会地域供給系統モデルの系統 II 77kV 地中送電系統 9) における配電用変電所の負荷（<71 MW）の範囲内である。このため、各配電用変電所の供給エリアに関して、概ね妥当な想定ができたと考えている。

各メッシュの電力需要および PVS 導入容量を比較した結果、Case-1 では、最大電力需要が 20 MW 以下のエリアにおいて、最大電力需要と PVS 導入容量とが同程度となる場合が多く、これらのエリアにおける PVS 導入容量は全体の 50%程度を占めた。一方、Case-2 では、戸建住宅や店舗・オフィスビル等が少なく、電力需要が小さいメッシュへの非住宅用 PVS の導入容量が大きくなる状況を想定しているため、最大電力需要が Case-1 と同程度のエリアでも非住宅用 PVS の導入容量のばらつきは大きくなった。特に、最大電力需要が小さいエリアにおいて PVS 導入容量が Case-1 よりも大きくなる場合が多く、最大電力需要が 10 MW 程度のエリアでは PVS 導入容量が最大電力需要の 2 倍になる場合もあった。

4.2.2 評価結果

各供給エリアにおける PVS 大量導入の影響を表す評価指標として、本研究では次の 2 項目を用いた。

- ・年間最大電力需要に対する年間最大余剰電力の割合（以下、比最大余剰電力）
- ・PVS の年間発電電力量に対する余剰電力量

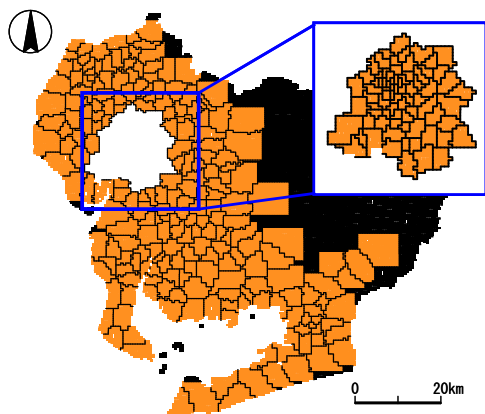


図 5 各配電系統の供給エリアの想定

の割合（以下、比余剰電力量）

各エリアの年間最大余剰電力を年間最大電力需要に対する割合で評価することで、当該変電所におけるバンク逆潮流の相対的な大きさを表すこととし、バンク逆潮流を行う際に必要な電圧を適正に維持のための装置の規模に関する評価指標とした。一方、PVS 大量導入を実現する際、コストの観点からはバンク逆潮流への対策装置の導入だけでなく、デマンドレスポンスによる昼間電力需要の増加や PVS 出力の抑制などの様々な対策を組み合わせることが重要である。そこで、バンク逆潮流を回避するための PVS 側の出力抑制量や余剰分を消費するための追加的な電力需要量に関する評価指標として PVS 発電電力量に対する余剰電力量の割合を用いた。

図 6 に、昇順整列した各供給エリアの比最大余剰電力と PVS 累積導入容量との関係を示す。余剰電力が発生しないエリアは Case-1 よりも Case-2 の方が多いが、これらのエリアにおける PVS 導入容量は Case-1 で 0.1 GW（2.6 %）、Case-2 で 0.2 GW（4.8 %）と大差ない。また、40%程度の比最大余剰電力を許容できる場合に導入可能な PVS 容量も、Case-1 および Case-2 とともに 1 GW である。しかし、PVS 導入容量の増加に対する比最大余剰電力の増加は Case-2 の方が大きい。このため、比最大余剰電力が 100 %まで許容できると仮定した場合、導入可能な PVS 容量は Case-1 の 4.1 GW に対し、Case-2 で 3.49 GW と 15%も減少した。する。ただし、前述のように Case-2 において比最大余剰電力が大きなエリアでは、町工場等の電力需要が適切に見積もられていない場合がある。非住宅用 PVS の導入分布の適切な想定については今後である。

図 7 に、各供給エリアの年間余剰電力量の昇順にて累積した PVS 導入容量と年間余剰電力量との関係を示す。仮に、前述の比最大余剰電力が大きなエリアには PVS が導入されないが、デマンドレスポンスによる昼間電力需要の増加や PVS 出力の抑制などによって余剰電力に対応して 3 GW の全 PVS を導入する場合、Case-1 では約 65 %の PVS において比余剰電力量は 10 %以下であるのに対し、Case-2 において比余剰電力量が 10 %以下となる PVS は 46%程度である。また、その際の全体の年間余剰電力量は Case-1 の 8.0 % (296 GWh) に対して Case-2 では 11.1 % (415 GWh) となり、40 %も増加する。

このように、非住宅用 PVS の場合、導入コストや日照条件等の観点からは Case-2 のように郊外の小規模な工場・倉庫の屋根などへの導入拡大が予想されるが、そのような場合、配電系統の供給エリアとしての余剰電力は、上述のように大きく増加する。したがって、系統への影響を緩和するという観点からは、Case-1 のように電力需要が大きいエリアの PVS 導入容量を増加させることが有効と考えられる。ただし、本検討では建物の高さを考

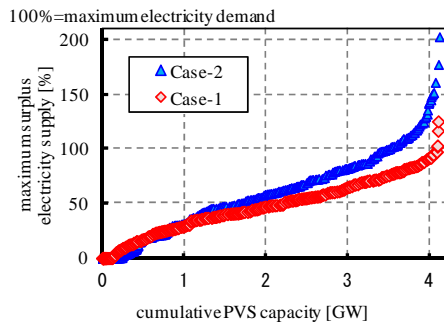


図 6 各配電系統の供給エリアの累積 PVS 導入量に対する最大余剰電力

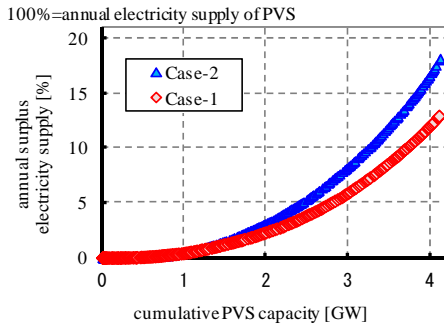


図 7 各配電系統の供給エリアの累積 PVS 導入量に対する累積の年間余剰電力量

慮していないため、Case-1 では影によって PVS 発電電力が小さくなる可能性がある。このような影響を踏まえて、電力需要が大きいエリアの PVS 導入容量を増加させるための経済的インセンティブ等を導入できれば、電力系統への影響を緩和しつつ、PVS 大量導入を実現する有効な方策になりえると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① 加藤, 今村, 鈴置, 日常交通行動の地域性を考慮した郊外住宅地における太陽光発電システム付戸建住宅居住の実質的省エネ性, 都市計画論文集, 査読有, Vol.47, No.3, 2002, 385-390

〔学会発表〕(計 1 1 件)

- ① 加藤, 今村, 鈴置, 住宅規模および交通行動の違いを考慮した住宅用太陽光発電システムの実質的省エネ効果の地域性～住宅地域の分散集中化の影響～, 第 31 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, No.7-4, 2012, CD-ROM
- ② 谷藤, 加藤, 鈴置, 対象エリアの面積に応じた空間平均日射量の短時間先予測精度に関する一検討, 電力系統技術研究会資料, PSE-13-005, 2013
- ③ 北山, 加藤, 鈴置, EV 充電方法による街区群の合計電力需要パターンに関する統計的評価, 第 32 回エネルギー・資源学会研

究発表会講演論文集, No.2-4, 2013, CD-ROM

- ④ 谷藤, 加藤, 鈴置, 空間平均日射強度の日別変動パターン分類に関する一検討, 平成 25 年度電気学会電力エネルギー部門大会論文集, No.262, 2013, CD-ROM
- ⑤ 北山, 栗本, 加藤, 鈴置, 地域メッシュ統計に基づく配電用変電所の電力供給範囲想定に関する一検討, 平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, No.A2-7, 2013, CD-ROM
- ⑥ 谷藤, 栗本, 加藤, 鈴置, 空間平均日射強度のランプ変動の予測に関する一考察, 電気学会新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム研究会資料, FTE-13-056/MES-13-012, 2013, 57-64
- ⑦ 杉村, 栗本, 加藤, 鈴置, 太陽光発電大量導入時における LFC 時間領域のネット電力負荷変動特性, 電気学会新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム研究会資料, FTE-13-058/MES-13-014, 2013, 71-77
- ⑧ 北山, 栗本, 加藤, 鈴置, 電用変電所の供給エリア単位でみた太陽光発電システム大量導入時のネット電力負荷に関する統計的評価～名古屋市内の様々なエリアを対象として～, 第 30 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, No.25-3, 2014, CD-ROM
- ⑨ 北山, 栗本, 加藤, 鈴置, 配電用変電所の供給エリア単位でみた住宅用分散型電源大量導入時のネット電力負荷に関する統計的評価, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, No.6-140, 2014, CD-ROM
- ⑩ 北山, 森田, 栗本, 加藤, 鈴置, 真鍋, 舟橋, 様々な配電用変電所供給エリアにおける住宅用分散型電源大量導入時のネット電力負荷に関する統計的評価, エネルギー資源学会研究発表会, No.13-2, 2014, CD-ROM
- ⑪ J. Kitayama, Y. Manabe, M. Kurimoto, T. Kato, T. Funabashi, Y. Suzuoki, Statistical Evaluation of Residual Electricity Load in Power Distribution Substation Supply Territory with High Penetration Residential Distributed Generators, The Int. Conf. on Electrical Engineering 2013 (ICEE 2013), PSMSA-0933, 2014, CD-ROM

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 丈佳 (KATO TAKEYOSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 90283465

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし