

郊外街区群の分散集中化による 住宅用太陽光発電システムの実質的省エネ性向上

加藤 丈佳¹・小林 敬幸²・谷川 寛樹³・成瀬 一郎⁴

¹非会員 名古屋大学准教授 工学研究科電子情報システム専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail:tkato@nuee.nagoya-u.ac.jp

²非会員 名古屋大学准教授 工学研究科化学・生物工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 名古屋大学教授 環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁴非会員 名古屋大学教授 工学研究科機械理工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

太陽光発電システム (PVS) の導入に適した郊外の戸建住宅における居住は、都心の集合住宅居住と比較して、住宅内や日常行動でのエネルギー消費量が大きい。このことを考慮して、名古屋都市圏の50地域を対象として、都心におけるPVSなしの集合住宅居住との比較により、郊外戸建住宅へのPVS導入による実質的な省エネ性を評価した。その結果、都心から十数km圏内の郊外地域であれば、日常行動における自動車利用を減少するように都市空間構造を都心並みに分散集中化することで、自動車利用が多い大家族においても、戸建住宅へのPVS導入は都心の集合住宅居住に対して実質的な省エネに寄与する可能性があることがわかった。

Key Words : photovoltaic power generation system, transport energy, energy conservation

1. はじめに

わが国では、省エネ・低炭素化のために太陽光発電システム (PVS) の大量導入が期待されており、2030年まで53 GWの導入を目標としている。このうちの60%は住宅への導入が想定されており¹⁾、郊外の戸建住宅を中心として新築住宅への大容量PVSの積極的な導入が期待されている。一方で、都市計画の観点からは、コンパクトシティ化によって都心居住を増加し、通勤や買い物等の短距離化や中高層集合住宅の増加による冷暖房・照明負荷の削減により、交通や居住に関わる省エネ・低炭素化が期待されている。したがって、郊外戸建住宅への大容量PVSの導入による低炭素化の効果については、長期的な視点からコンパクトシティ化による潜在的な交通・住宅エネルギーの削減効果を考慮した評価が必要である。逆に、コンパクトシティ化による都心の低炭素化を議論する際は、交通エネルギーの削減効果だけでなく、住宅用PVSの実質的なエネルギー削減効果を高めるような都市計画のあり方を考慮することが重要である。

このような点に着目した検討の第一段階として、本稿では、1~6人家族の世帯が名古屋都市圏の50地域に居住する場合を想定し、世帯による住宅規模の違いおよび居住地域による日常行動の移動距離の違いを考慮して、

PVSなしの都心集合住宅居住との比較により、郊外における戸建住宅居住の実質的な省エネ性を評価した。その際、現状の都市における街区郡構成だけでなく、将来に向けた街づくりにおいて徒歩や自転車を中心に買い物等の日常行動が可能ないように都市空間構造が分散集中化されることを想定し、PVS付きの郊外戸建住宅居住の実質的な省エネ性に与える影響を評価した。

本稿の構成は以下の通りである。まず、各地域における居住および日常行動のためのエネルギー消費量の計算方法を概説する。次に、PVSなしの都心集合住宅居住との比較により、現状の都市構成におけるPVS付きの郊外戸建住宅居住の実質的な省エネ性を評価する。最後に、郊外の居住地域がパーソントリップ (PT) データにおける集計単位である基本ゾーンまたは中ゾーンごとに分散集中化される状況を想定し、PVS付きの郊外戸建住宅居住の実質的な省エネ性に与える影響を評価する。

2. 計算方法

(1) 想定および計算の概要

図1に示す中京都市圏の50地域に、表1に示す1~6人家族の6種類の世帯がそれぞれ居住すると想定した。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。なお、家族構成を表す記号は、後述する居住エネルギー消費量の算定に参照した文献2)に準じており、1人家族の場合を除いて添え字**b**は勤め人が男性1人を表す。

各世帯が図1に示す中京都市圏の50地域にそれぞれ居住する場合について、後述の方法により、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 、交通に関する一次エネルギー消費量 E_T 、PVSからの電力供給量 E_{PV} （一次エネルギーに換算した）をそれぞれ算定し、これらを(1)式のように集計して、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]を居住地域別に算定した。

$$E = E_R + E_T - E_{PV} \text{ [MJ/年]} \quad (1)$$

図1の50地域は、後述するPTデータの集計単位である中ゾーンに対応する。中ゾーンは複数の基本ゾーンから構成されるが、本稿では各中ゾーンにおいて移動の起点（居住地）が含まれる基本ゾーンを特定していない。したがって、 E_T については、中ゾーン内の複数の基本ゾーンに関する平均値を計算することになる。

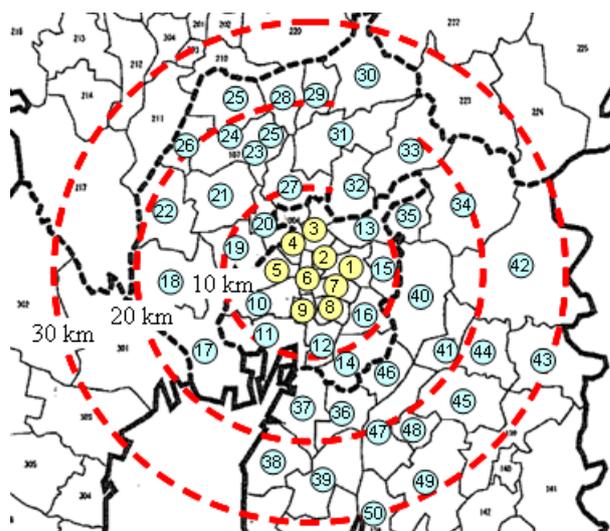
本稿では、中ゾーン50地域のうち、図1に示す同心円の中心点（名古屋市中区役所）から5km圏内を都心地域（計9地域）、半径5km圏外の地域を郊外地域（計41地域）と呼ぶこととし、都心地域に居住する場合はPVSなし（ $E_{PV} = 0$ ）の集合住宅に郊外地域に、居住する場合はPVS付きの戸建住宅に居住するものとした。そして、都心の9地域における E の平均値 E_{UA} を算定し、 E_{UA} との比較により、表1の各世帯が郊外地域にてPVS付き戸建住宅に居住する場合の実質的省エネ性を評価した。

なお、現状では都心の9地域においても多数の戸建住宅が存在する。このため、個々の世帯の観点からPVS導入の実質的省エネ効果を評価するのであれば、都心地域の戸建住宅居住が最も効果的と考えられる。しかし、本稿ではPVSが大量に導入されるであろう将来を検討対象としており、都心地域については集合住宅居住のみを想定している。したがって、本稿の検討は、将来的な都心集中型の都市計画における集合住宅居住との比較による郊外戸建住宅へのPVS大量導入の実質的省エネ効果に関する評価と位置づけることができる。

(2) 住宅延床面積の想定

郊外地域における戸建住宅の延床面積は、平成17年国勢調査に記載の愛知県における世帯人数ごとの持ち家の平均値として、表1に示す値を用いた。なお、都心地域も含めて本稿で対象とした50地域における戸建住宅の平均延床面積の標準偏差は平均値の5%程度であることから、居住地域によらず延床面積は同じとした。

一方、都心地域における集合住宅の延床面積については、郊外のPVS付きの戸建住宅居住との比較として将来



1. 千種区, 2. 東区, 3. 北区, 4. 西区, 5. 中村区, 6. 中区(中心部), 7. 昭和区, 8. 瑞穂区, 9. 熱田区, 10. 中川区, 11. 港区, 12. 南区, 13. 守山区, 14. 緑区, 15. 名東区, 16. 天白区, 17. 飛鳥村, 18. 佐屋町, 19. 大治町, 20. 西枇杷島町, 21. 稲沢市, 22. 佐織町, 23. 一宮市南部, 24. 一宮市中央部, 25. 一宮市北部, 26. 尾西市, 27. 西春町, 28. 江南市, 29. 大口町, 30. 大山市, 31. 小牧市, 32. 春日井市西部, 33. 春日井市東部, 34. 瀬戸市, 35. 尾張旭市, 36. 大府市, 37. 東海市, 38. 知多市, 39. 東浦町, 40. 長久手町, 41. 三好町, 42. 豊田市北部, 43. 豊田市東部, 44. 豊田中央部, 45. 豊田市南部, 46. 豊明市, 47. 刈谷市, 48. 知立市, 49. 安城市, 50. 高浜市 (市区町村名は平成13年PT実施時)

図-1 検討対象地域（PTの中ゾーン）

表-1 世帯構成員および住宅に関する想定

世帯分類	構成員	延床面積 [m ²]		PVS容量 [kW]
		都心集合	郊外戸建	
1b	女勤め人	35	103	3.1
2b	男勤め人, 主婦	53	118	3.5
3b	男勤め人, 主婦, 小学生	57	123	3.7
4b	男勤め人, 主婦, 小学生, 中学生	61	126	3.8
5b	男勤め人, 主婦, 小学生, 中学生, 高校生	78	144	4.3
6b	男勤め人, 主婦, 小学生, 中学生, 高校生, 男高齢者	95	170	5.1

の都心集中型の都市空間構造における住居として想定する必要がある。そこで、世帯人数が少ない場合は借家居住が多いと想定し、世帯人数が4人以下の場合には平成17年国勢調査に記載の世帯人数ごとの借家の平均値をとした。一方、世帯人数が多い場合は、持家居住が多いと想定し、以下のように想定した。まず、平成20年度住宅土地統計調査に基づき、愛知県において集合住宅に居住する世帯人数 x と畳数 z との関係を $z = 6.9x + 15.8$ 、畳数 z と延床面積 y との関係を $y = 2.5z - 0.53$ と表し、これらを用いて世帯人数と延床面積との関係を一次式 $y = 17x + 39$ と表した。その結果、4~6人家族の集合住宅の延床面積は郊外戸建住宅と同程度となり、上述の国勢調査における借家と比較して非常に大きくなった。そこで、4人家族

の延床面積が国勢調査における世帯人数4人の借家の平均値に一致するように補正定数($=-31$)を求め、 $y=17x+7$ によって4人以上の世帯の将来の都心集中型の都市構成における集合住宅の延床面積を想定した。

このようにして想定した世帯人数別の郊外地域の戸建住宅および都心居住の集合住宅の延床面積を表1に示す。なお、延床面積に基づき同表右端のPVS容量を想定したが、その方法については後述する。なお、将来の都心集中型の都市空間構造における集合住宅の延床面積の想定については再考の余地があり、今後の検討課題とする。

(3) 居住エネルギー消費量 E_R の算定方法

文献2)においてNHK国民生活時間調査等に基づき世帯構成別に算定された延床面積と居住エネルギー消費量との関係図から、上述の世帯構成ごとに算定した延床面積の時の値を読みとり E_R とした。なお、文献2)では、 5 m^2 または 10 m^2 単位で離散的に E_R がプロットされているが、プロット間の値については線形補間した。

(4) 交通エネルギー消費量 E_T の算定方法

交通に関わるエネルギー消費量 E_T については、目的 i の年間合計移動回数 c_i [回/年]、目的 i 別の移動先区分 j の割合 D_{ij} 、目的 i ・移動先区分 j 別の利用交通機関 k の割合 (交通機関分担率) 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]をそれぞれ後述のように想定し、式(2)に示す様にこれらを集計して算定した。

$$E_T = \sum_i \sum_j \sum_k c_i \cdot D_{ij} \cdot P_{ijk} \cdot L_j \cdot e_k \quad [\text{MJ/年}] \quad (2)$$

a) 目的別移動回数 c_i の想定

居住エネルギー消費量 E_R との整合性のため、NHK国民生活時間調査³⁾を用いて、目的別(買物、通院、飲食、通勤)の移動回数 c_i を後述の手順で想定した。なお、レジャー活動などの遠距離の移動を考慮していない。これは、本稿では日常生活における移動を対象としていること、および図1に示した検討対象範囲を大きく超える遠距離の移動については居住地による移動距離の差が小さいと考えられることのためである。

- 各世帯構成員について、各目的の国民生活調査の平日・土曜・日曜別の行為者比率(1日の中で該当の行動を15分以上した人が全体に占める割合)をそれぞれの年間日数(平日:238日、土曜:52日、休日:75日(夏期冬期休暇を含む))に乗じることで、世帯構成員の目的別の年間移動回数を平日、土曜、日曜別に算定する。なお、飲食については、国民生活時間調査に該当する項目がないため買物と同じ回数とした。ただし、後述のようにPT調査に基づく D_{ij} および P_{ijk} の想定は買物と異なる。
- 算定された移動回数を平日、土曜、日曜別に1年間の中でランダムに分配し、行為が行われた日を決定

表-2 各世帯の日常行動に関する目的別移動回数

世帯分類	外出回数(回/年)		
	買物・外食	通院	通勤
1b	183	15	234
2b	257	39	256
3b	257	37	256
4b	258	44	256
5b	277	54	256
6b	299	96	256

する。

- 同じ行為を複数の世帯構成員が同じ日に行う場合は、一緒に同じ目的地(移動先区分)に移動するとし、世帯としての目的別・移動人数別の移動回数を算定する。ただし、後述のように D_{ij} および P_{ijk} については、PTデータを用いて地域別に想定しただけであり、世帯構成員の属性別に想定できていない。このため、徒歩や自転車为主体と考えられる小中学生・高校生の移動手段をその他の家族と同じとすると、自動車等のエネルギー消費を伴う移動回数を過大評価する可能性がある。そこで本稿では、小学生の全行動および中学生および高校生の買い物については、女勤め人および主婦が同行することとした。

このようにして想定した各世帯の年間移動回数を表2に示す。大家族の世帯ほど移動回数は多いが、個々の世帯構成員の移動回数の多い買物については、複数人で一緒に行動する場合もあるため、例えば4人家族の場合、世帯としての合計移動回数は個々の世帯構成員の移動回数の単純合計値の65%程度となる。この割合は世帯人数が多い程小さい。一方、個々の世帯構成員の移動回数が少ない通院の場合、上記の割合は世帯人数によらず80%程度である。なお、本来であればNHK国民生活時間調査だけでなくPTも考慮して居住地域別に c_i を想定する必要があり、今後の課題とする。

b) 目的別の移動先割合 D_{ij} の想定

D_{ij} および P_{ijk} については、中京都市圏を対象とした平成13年PT調査に基づき想定した。なお、個々の基本ゾーンを居住地(起点)としてPTデータを集計することで特定の移動先についての目的および移動手段の割合を算定することができるが、サンプル数が少なく、適切な値とならない可能性がある。そこで本稿では、各中ゾーンにおいて特定の基本ゾーンを居住地として想定するのではなく、複数の基本ゾーンに関する平均的な行動として、以下のように D_{ij} および P_{ijk} を想定した。同様に、移動先についても、PT調査の集計区分である基本ゾーン内、複数の基本ゾーンからなる中ゾーン内(ただし当該基本ゾーンを除く)、隣接する中ゾーン、複数の中ゾーンからなる20ゾーン内(ただし当該中ゾーン、隣接中ゾ

ーンを除く), 他20ゾーン (ただし当該20ゾーン, 隣接中ゾーンを除く) の5区分を想定した. なお, 以降では, 20ゾーンの事を大ゾーンと呼ぶこととする.

移動先区分の割合 D_{ij} については, 買物, 通院, 飲食に関して, 各地域 (中ゾーン) の有効回答者数に対する上記5区分への移動人数の割合として算定した. また, 通勤については, いずれの居住地の場合も名古屋市中区を勤務地とした.

図2に買物, 通院, 飲食に関する D_{ij} を示す. いずれの目的についても, 居住地によらず, 基本ゾーン内の移動割合が半分程度を占めている. 特に, 買物については, 基本ゾーン内の移動割合が大きく, 都心から5 km圏外の郊外地域の場合, 買物に関する基本ゾーン内の移動割合は平均60%程度となる. 都心から5 km圏内の都心地域の場合, 個々の基本ゾーンが小さいため買物に関する基本ゾーン内の移動割合は平均すると50%程度であるが, 都心地域および郊外地域のいずれも95%の移動は隣接中ゾーンまでで行われる. 通院および飲食については隣接中ゾーンまでの移動は90%程度であり, 買物と比較してより遠距離の移動割合が大きい.

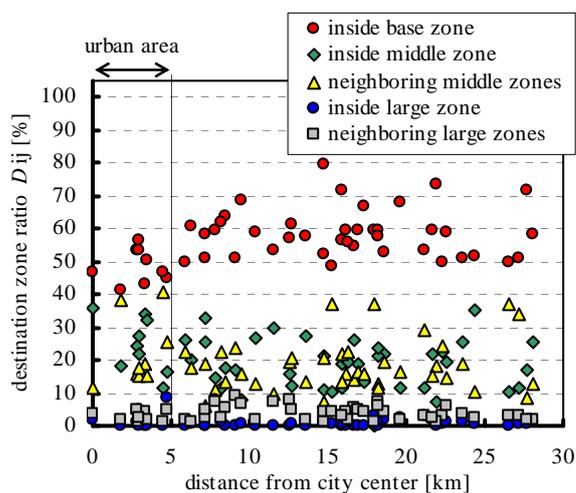
c) 目的別・移動先別の移動手段割合 P_{jk} の想定

移動手段としては自動車, バスおよび鉄道の3種類を想定した. D_{ij} と同様に, 各地域 (中ゾーン) ごとの有効回答者数に対する上記5区分への主な移動手段を自動車, バス, 鉄道とした人数の割合として P_{jk} を算定した.

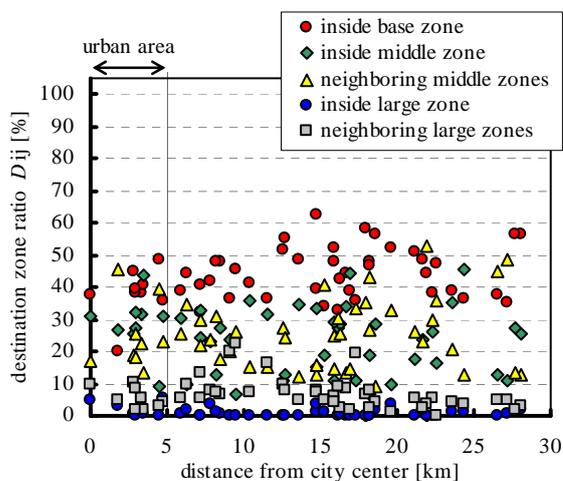
一例として, 買物のための移動先が基本ゾーン内および大ゾーン内の場合における地域別の P_{jk} を図3に示す. 同図(a)に示す基本ゾーン内に買物に行く場合, ほぼ全ての地域において移動手段は徒歩・自転車か自動車のいずれかである. 都心部では平均すると約90%は徒歩・自転車による移動であるが, 郊外になるほど自動車の割合が増加し, 概ね都心から15 kmの地域において, 徒歩・自転車と自動車の割合が同程度となる. 同図(b)に示す大ゾーン内の買物については, 郊外地域を起点 (居住地) とする多くの場合において自動車の割合が非常に大きい. 一方, 都心地域を起点として大ゾーン内に買物に行く場合は, 居住地によってはバスや電車 (地下鉄) の割合が大きい.

買物, 通院および飲食への移動に関する移動先別の移動手段の割合について, 都心地域および郊外地域の平均値を算定した. それぞれ結果を図4~図6に示す. 各図には, 上述の目的別の移動先割合 D_{ij} を併記する. 買物に関しては, 概ね上述の通りであるが, 最も遠方の隣接大ゾーンへの移動については, 郊外地域の場合, 自動車の割合は大ゾーン内よりも減少し, 代わりに電車の移動が30%程度になる. 一方, 都心地域の場合, 大ゾーンへの移動において自動車の割合が最も大きい.

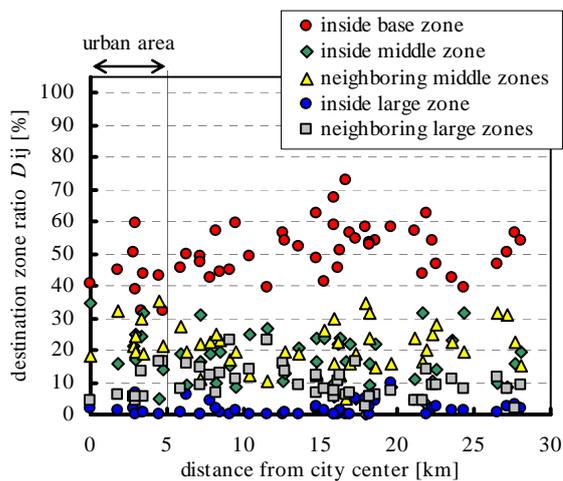
図5に示す通院の場合も概ね買物と同様であるが, 買



(a) 買物



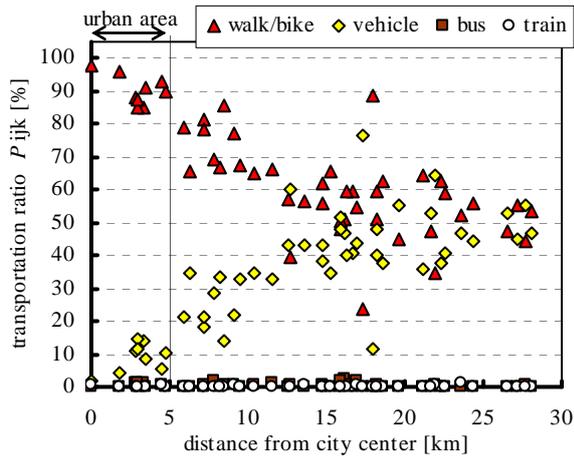
(b) 通院



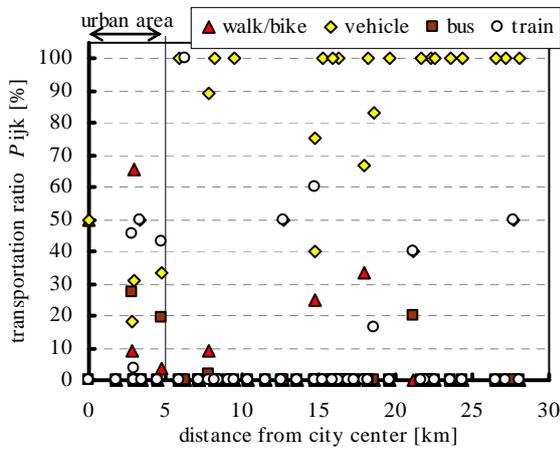
(c) 飲食

図2 各地域における目的別の移動先割合

物と比較して全体的に徒歩・自転車の割合が小さく, 代わりにバスや電車の移動が大きい. 図6に示す飲食の場合も概ね買物と同様であるが, 買物や通院と比較してバ



(a) 基本ゾーン内の移動



(b) 大ゾーン内の移動

図-3 買物への移動に関する各地域の移動手段の割合

スの移動割合が小さい。また、郊外地域に関しては、中ゾーン内、隣接中ゾーンおよび大ゾーン内の移動において自動車の割合が80~90%と非常に大きい。

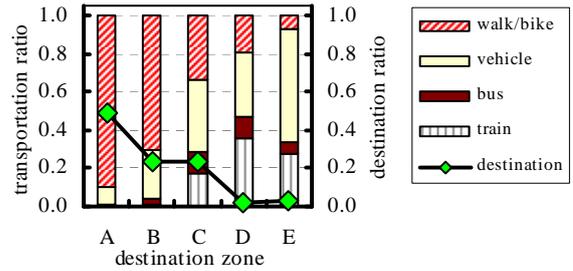
d) 移動先別の移動距離 L_j の想定

全ての移動先について移動距離を算出すると計算が膨大となることから、計算が容易に行えるように各移動先のゾーンの面積を用いた簡易的なモデルを用いて、以下の手順で移動先 j 別の往復移動距離 L_j を想定した。

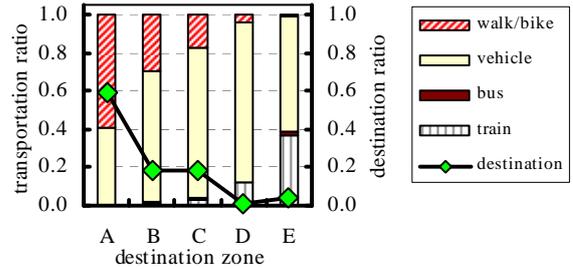
大ゾーン内の移動を例として計算方法を説明する。まず、居住地が含まれる大ゾーンを正方形によって表す。正方形は9つの小区域から構成され、各小区域は100m格子によって表される。居住地は中心の小区域の中心点に位置するものとする。そして、片道移動距離を居住地から各小区域の中心点までの平均距離と各小区域の中心点から小区域内の100m格子の各中心点までの平均距離(区域の一辺の長さの0.24倍)との合計値として表す。

このようにして算定した大ゾーン内および隣接大ゾー

A: 基本ゾーン内, B: 中ゾーン内, C: 隣接中ゾーン, D: 大ゾーン内, E: 隣接大ゾーン内



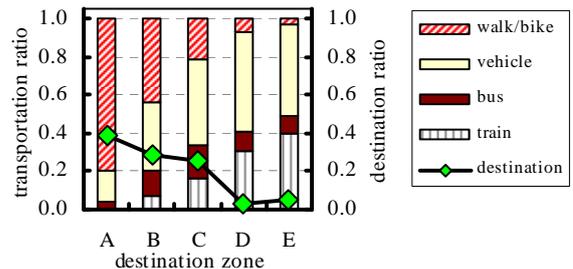
(a) 都心地域



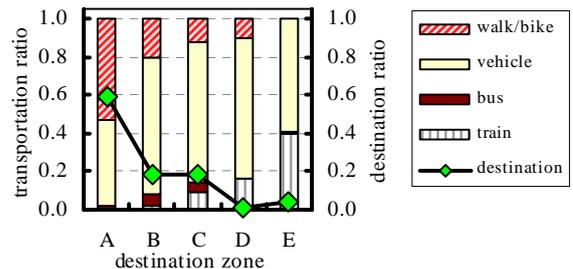
(b) 郊外地域

図-4 買物に関する移動先別の移動手段の割合

A: 基本ゾーン内, B: 中ゾーン内, C: 隣接中ゾーン, D: 大ゾーン内, E: 隣接大ゾーン内



(a) 都心地域

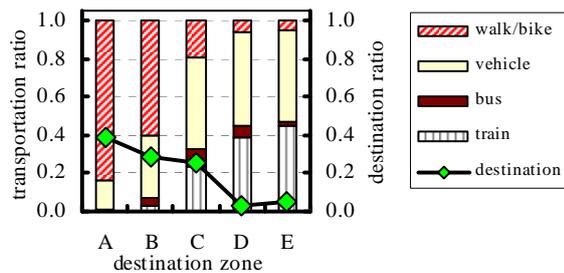


(b) 郊外地域

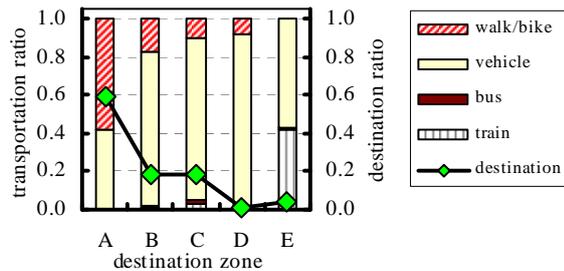
図-5 通院に関する移動先別の移動手段の割合

ン間の移動距離の妥当性を確認するため、移動の起点(居住地)を各中ゾーンに含まれる市区町村役場として、Google Mapを用いて算定した起点間の自動車移動距離と比較した。その結果、本稿で用いた方法の場合、平均すると大ゾーン内の移動は15%程度短め、大ゾーン間の移動は27%程度長めであった。このように、本稿で用いた

A:基本ゾーン内, B:中ゾーン内, C:隣接中ゾーン, D:大ゾーン内, E:隣接大ゾーン内



(a) 都心地域



(b) 郊外地域

図-6 飲食に関する移動先別の移動手段の割合

格子点間の距離に基づく移動距離の想定方法の場合、特に短距離の移動については、実際よりも短く考えられる。そこで本稿では、 L_j を算定する基となる正方形の面積を以下のように想定した。

- 基本ゾーン内の移動の場合：
(居住地が含まれる中ゾーンの面積 ÷ 基本ゾーンの個数) $\times 2^2$
- 中ゾーン内の移動の場合：
居住地が含まれる中ゾーンの面積 $\times 2^2$
- 隣接中ゾーンへの移動の場合：
居住地が含まれる中ゾーンの面積と隣接する中ゾーンの面積の合計 $\times 1.5^2$
- 大ゾーン内の移動の場合：
居住地が含まれる20ゾーンの面積 $\times 1$
- 隣接大ゾーンへの移動の場合：
居住地が含まれる20ゾーンの面積と隣接する20ゾーンの面積の合計 $\times 1$

その結果、移動距離 L_j は、都心地域における基本ゾーン内移動場合で3km程度、郊外地域における隣接大ゾーンへの移動の場合で30km程度となった。また、上述の D_j および P_{jk} を考慮し、次式によって全ての目的・移動先合計の自動車の年間走行距離 $L_{自動車}$ を算定した。

$$L_j = \sum_i \sum_k c_i \cdot D_{ij} \cdot P_{ijk} \cdot L_j \quad (j = \text{自動車}) \quad [\text{km/年}] \quad (3)$$

結果を図7に示す。世帯人数によって走行距離は異なるものの、概ね都心地域では年間2,000km程度、郊外地域で6,500km程度である。ただし、都心からの距離が同

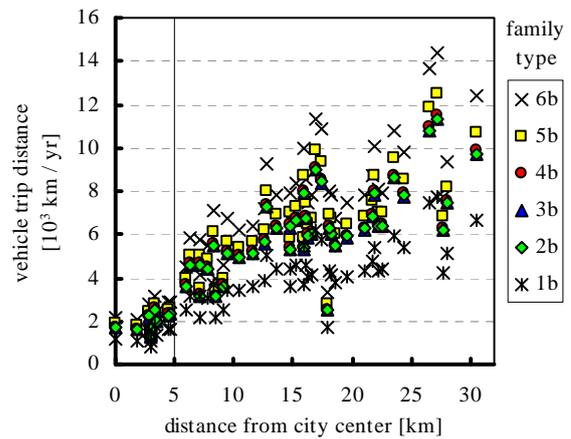


図-7 各居住地における年間自動車走行距離

程度でも居住地によって年間走行距離は大きく異なる。例えば、都心部から18kmに位置する一宮市中央部の年間走行距離は都心地域と大差ないのに対し、一宮市南部の年間走行距離は一宮市中央部の2~3倍である。また、都心部から27 kmの豊田市北部の場合、年間走行距離は14,000km程度に達する。

e) 各移動手段のエネルギー消費原単位 e_k の想定

各移動手段のエネルギー消費原単位 e_k をそれぞれ以下のように想定した。自動車については、ハイブリッド車およびワゴン車の2種類を想定し、 e_k としてそれぞれカタログ燃費の半分の1.85 MJ/kmおよび5.56 MJ/kmとし⁴⁾、乗車人数によらず一定とした。バスおよび鉄道の e_k については、文献5)に基づき利用した家族の人数に比例するとして、それぞれ0.672 MJ/人・kmおよび0.196 MJ/人・kmとした。また、徒歩・自転車の移動エネルギーは発生しないとした。

(5) PVSからの電力供給量 E_{PV} の算定方法

都心部から5 km圏外の郊外地域の戸建住宅にPVSが導入されると想定した。上述のように想定した戸建住宅は総二階建てで南北傾斜30度の切妻屋根を持つと想定し、表1に示した延床面積の0.5倍を屋根面積、その40%に効率が0.15 kWp/m²のPVSが設置されるとして各世帯の戸建住宅のPVS設置容量を前出の表1に示すように算定した。

一方、1kWあたりの年間発電電力量については、名古屋市において2005年4月~2006年3月の一年間にサンプリング間隔1分で観測された水平面全天日射量をIEA法⁶⁾によって傾斜角は30度の傾斜面日射量に変換し、インバータ効率やMPPTミスマッチ等による損失を考慮したシステム効率を80%と想定して、 $P_{PV} = 1,184 \text{ kWh/kW}$ と想定した。そして、系統電力の受電端効率36%を考慮して、PVSの設備容量1kWあたり年間一次エネルギー換算して11.8GJ/kWの電力が供給されると想定した。

3. 現状の都市構成に関する計算結果

(1) 居住エネルギー消費量 E_R およびPVS電力供給量 E_{PV}

上述の様に、本稿における計算の場合、 E_R と E_{PV} は居住地によらず世帯人数別に決定される住宅延床面積に比例した値となる。算定した E_R と E_{PV} を図8に示す。世帯人数が多い程、戸建住宅と集合住宅の E_R の差の絶対値は増加するが、差の割合は世帯人数によらず30%強である。

ただし、戸建住宅にPVSが導入される場合、 E_{PV} の分だけ各世帯への一次エネルギー供給量が削減されることを考慮すると、都心地域でPVSなしの集合住宅に居住するよりも郊外地域でPVS付きの戸建住宅に居住する方が省エネとなる。特に、世帯人数が少ない場合、PVS導入の省エネ効果は大きい。これは、世帯人数が増えるにしたがって図8に示すように E_R が増加するのに対し、表1に示したように世帯人数によるPVS設備容量の差は小さいためである。

このように、居住に関して必要な外部からの一次エネルギー供給量のみに着目すれば、都心地域におけるPVSなしの集合住宅と比較して郊外地域における戸建住宅へのPVS導入は実質的に省エネになると言える。そこで次節では、さらに交通エネルギー消費量 E_T を考慮し、PVS導入の実質的省エネ性を評価する。なお、集合住宅居住の場合には、燃料電池や蓄電池を用いて複数世帯で電力および熱の融通を行うことで、 E_R を削減できる可能性がある。このようなオプションを考慮した検討については、今後の課題とする。

(2) 交通エネルギー消費量 E_T の地域差

自動車としてワゴン車を用いる場合について、各地域における世帯別の交通エネルギー消費量 E_T を図9に示す。図4～6に示した各目的における移動手段の割合からわかるように、都心地域における短距離移動を除いて、エネルギー効率が悪い自動車の割合が大きい。したがって、図9の結果は図7に示した自動車の年間走行距離に概ね比例する。その結果、自動車の利用が少ない都心地域における E_T は10～20GJであり、図8に示した集合住宅における E_R の半分以下である。郊外地域では自動車の年間走行距離が長いこと E_T は大きいが、上述のように自動車の年間総距離が大きい豊田市西部の場合でも6人家族において80GJであり、6人家族で戸建住宅に居住する場合に E_R の半分程度である。さらに、自動車としてエネルギー効率がワゴン車の3倍程度のハイブリッド車を用いると E_T は世帯構成・地域によらずワゴン車の場合の30～40%となり、大きく減少する。

(3) 総エネルギー消費量 E の地域差

上述の(1)式に図8に示した E_R および E_{PV} 、図9に示した自動車ワゴン車の場合の E_T を代入し、各地域における年間総一次エネルギー供給量 E を各世帯について算定し

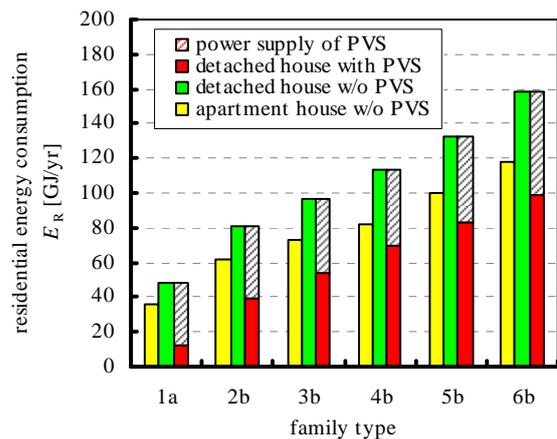


図8 世帯構成別の居住エネルギー消費量およびPVSによる電力供給量

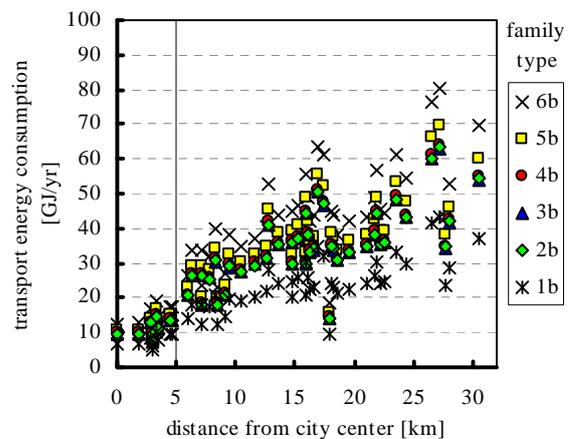
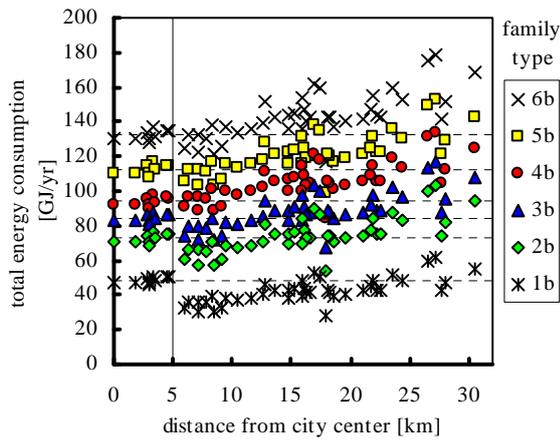


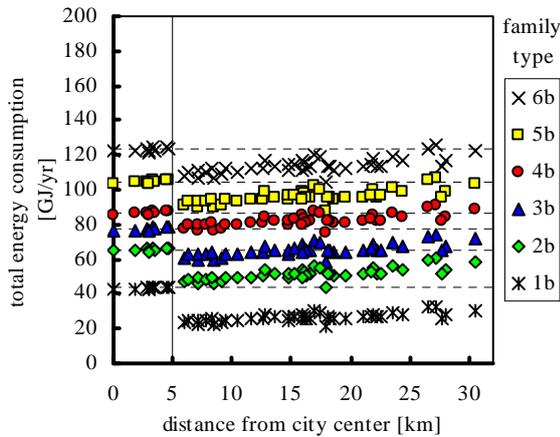
図9 各地域における交通エネルギー消費量

た。結果を図10(a)に示す。同様に、 E_T の計算においてハイブリッド車を想定した場合の E を図10(b)に示す。同図における破線の水平線は都心地域における E の平均値(E_{UA})を表す。同図に示すように、世帯人数が少ない場合には、多くの郊外地域における E は E_{UA} よりも小さく、交通エネルギーの増加を考慮しても、郊外におけるPVS付きの戸建住宅居住は都心におけるPVSなしの集合住宅居住よりも実質的に省エネになると考えられる。

一方、世帯人数が多くなるにしたがい、PVS付きの戸建住宅居住の方が省エネとなる地域の範囲は狭くなる。例えば、3人家族の世帯では都心から十数km圏外、4人家族の世帯では6～7km圏外になると、 E_T の増加により、PVSを導入しない都心居住の場合よりも世帯への一次エネルギー供給量 E は大きくなる。なお、上記のような都心の集合住宅の延床面積の想定方法による影響により、4人家族の場合において各郊外地域の E と都心地域の E_{UA} との差が最も大きい。集合住宅の延床面積については再検討の余地があるものの、概して大家族の場合には、省エネの観点からは、郊外にてPVS付き戸建住宅に居住す



(a) ワゴン車の場合



(b) ハイブリッド車の場合

図10 各地域における合計一次エネルギー消費量

るよりも、都心にてPVSなし集合住宅に居住する方がよいことになる。

ただし、図10(b)に示すように、自動車として燃費のよいハイブリッド車を用いる場合、 E_T の地域差は小さくなり、6人家族の世帯でも、郊外におけるPVS付きの戸建住宅居住は都心におけるPVSなしの集合住宅居住よりも実質的に省エネになると考えられる。

4. 都市空間構造の分散集中化に関する計算結果

(1) 計算方法

上述のように、多人数の世帯の場合、自動車の利用回数が多いため、一次エネルギー消費削減の観点からは、郊外にてPVS付き戸建住宅に居住するよりも、都心にてPVSなし集合住宅に居住する方がよいと考えられる。しかし、大家族が都心の集合住宅に居住することは現状との乖離があることから、郊外であっても自動車の利用回数を削減できるような街づくりが必要と考えられる。

一方、図1に示した都心から5km圏内の現状の都心地

域においても、戸建住宅が多いが日常生活において自動車の利用回数が少なく、移動距離が短い地域が存在する。平成17年国勢調査メッシュ統計を集計した結果、本稿で想定した都心地域の場合、平均すると戸建および長屋・共同住宅の割合は、それぞれ53%および47%である。一方、郊外地域の場合、平均すると戸建および長屋・共同住宅の割合は、それぞれ56%および44%であり、大差ない。したがって、郊外地域がそれぞれの拠点を中心として住宅密度を高め、現状の都心地域と同様の住宅地域を形成することができれば、自動車利用回数の多い大家族の場合も、郊外戸建住宅へのPVS導入は実質的な省エネに貢献できると考えられる。

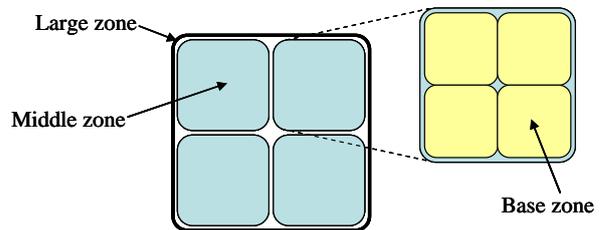
そこで本稿では、現状の都市空間構造に加え、現実的な分散集中化として以下の2ケースを想定し、PVS付きの郊外戸建住宅居住の実質的な省エネ性を評価した。

ケース0：現状の都市空間構造

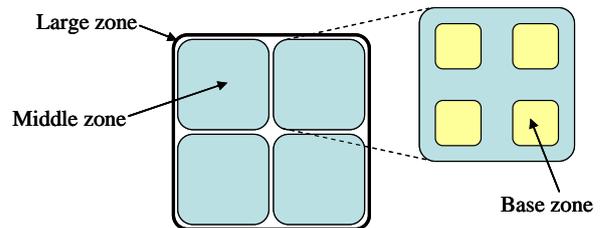
ケース1：基本ゾーン単位の分散集中化

ケース2：中ゾーン単位の分散集中化

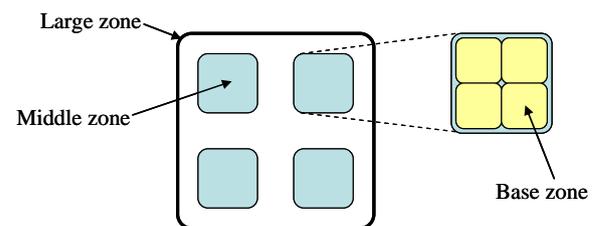
図11に郊外地域における分散集中化の概念図を示す。同図(a)~(c)はいずれも大ゾーンは4つの中ゾーンから構成され、各中ゾーンは4つ基本ゾーンから構成された状況を表している。ただし、同図(a)に示す現状の都市空間



(a) 現状の街区群構成



(b) 基本ゾーン単位の街区群の分散集中化



(c) 中ゾーン単位の街区群の分散集中化

図11 分散集中化型の都市構成の概念図

構造に対し、同図(b)では各中ゾーンにおける基本ゾーン単位で分散集中化し、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、基本ゾーンの中心点間でみれば図11(a)の現状と同じである。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。

こ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都市空間構造を想定していることになる。ここで、日常生活において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、郊外の各地域について、上記の(2)式によって交通エネルギー消費量 E_T を算定する際、以下のように想定した。

○ ケース1：基本ゾーン単位の分散集中化

- 基本ゾーン内の目的別の移動手段割合 P_{jk} として、都心地域の平均値(図4~6の(a)の基本ゾーン内の値)を使用
- 基本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(現状の平均3.9kmから1.6kmに減少)

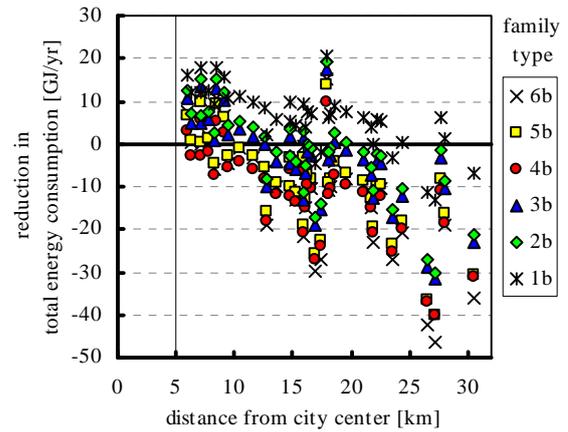
○ ケース2：中ゾーン単位の分散集中化

- 基本ゾーン内および中ゾーン内の目的別の移動手段割合 P_{jk} として、都心地域の平均値(図4~6の(a)の基本ゾーン内および中ゾーンの値)を使用
- 基本ゾーン内および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(基本ゾーン内では現状の平均3.9kmから1.6kmに減少、中ゾーン内では現状の平均7.8kmから4.2kmに減少)

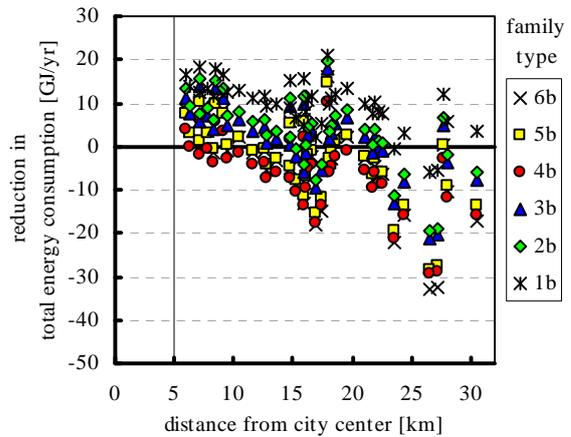
なお、その他の値は現状と同じと想定した。

(2) 計算結果

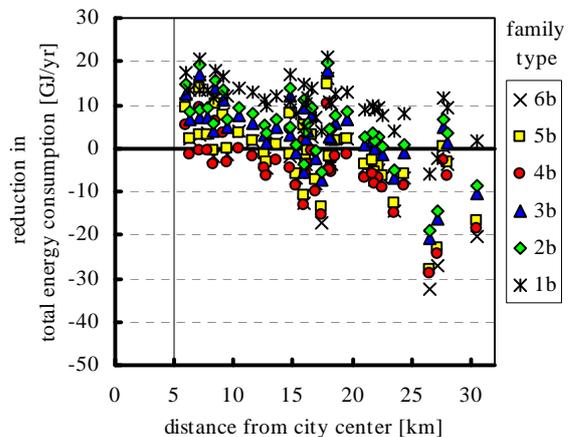
上述のような3ケースについて、各地域における世帯への一次エネルギー供給量 E を算定し、都心9地域における E の平均値 E_{UA} からの削減量を算定した。結果を図12に示す。図12(a)に示す現状の都市空間構造の場合、上述のように、3人家族の世帯では都心から十数km圏外、4人家族になると6~7km圏外になると、交通エネルギーの増加により、PVSを導入しない都心居住の場合よりも一次エネルギー消費量は大きかった。これに対し、図12(b)に示す基本ゾーン単位で分散集中化する場合、例外はあるものの、3人家族では都心から20km圏内まではPVSなしの都心集合住宅居住よりもPVS付の郊外戸建住宅居住の方が省エネである。4人家族の場合も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。その他の世帯の場合も同様であり、郊外地域における分散集中化により、戸建住宅へのPVS導入が実質的に省エネとなる範囲がそれぞれ数km拡大する。さらに、図12(c)に示す中ゾーン単位で分散集中化する場合には、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



(a) 現状の都市空間構造



(b) 基本ゾーン単位での分散集中化



(c) 中ゾーン単位での分散集中化

図-12 郊外地域における空間構造による省エネ性の相違

る範囲が拡大している。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都心におけるPVSなしの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、本稿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、本稿で示したように、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な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。

5. おわりに

本稿では、勤め人が都心へ通勤する4~6人家族の世帯がPVS付き戸建住宅に居住する場合を想定し、都心にてPVSなしの集合住宅に居住する場合との比較により、PVSの実質的な省エネ効果を評価した。主な結果は以下のとおりである。

- 日常行動にて利用する自動車が燃費のよいハイブリッド車の場合、大家族の世帯でも、郊外におけるPVS付きの戸建住宅居住は都心におけるPVSなしの集合住宅居住よりも実質的に省エネになる。
- 燃費の悪いワゴン車を利用する場合、3人家族の世帯では十数km圏外、4人家族の世帯は6~7km圏外の郊外地域にてPVS付の戸建住宅に居住するよりも、都心にてPVSなしの集合住宅に居住の方が省エネになる。
- 住宅密度を都心地域並みに高めるように郊外地域を分散集中化することで、日常行動における自動車利用が減少するため、PVS付の郊外戸建住宅居住の方が省エ

ネとなる都心からの範囲は数km拡大する。

今後は、物流におけるエネルギー消費量やPVS大量導入による電力系統への影響を考慮して、PVS大量導入に適した大都市圏のあり方について検討する予定である。

本研究の一部は環境省の環境研究総合推進費（研究課題番号E-1105）および平成21-24年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究（B）（No.21360127）の一環として行われた。また、国土交通省中部地方整備局よりデータの提供を受けた。記して深謝する。

参考文献

- 1) NEDO：2030年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）に関する見直し検討委員会報告書，2009.
- 2) Y. Shimoda, T. Asahi, A. Taniguchi, M. Mizuno: "Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model", Energy, Vol.32, No.9, pp.1617-1633, 2007.
- 3) NHK放送文化研究所：国民生活時間調査 2005, 2005.
- 4) RESPONSE: 「e-燃費」
<http://response.jp/e-nenpi/>（アクセス日 2011.4.30）
- 5) エネルギー経済統計要覧，省エネルギーセンター2010.
- 6) 日本太陽エネルギー学会：「太陽エネルギーの基礎と応用」，オーム社，pp.28-34, 1978

IMPROVEMENT OF PRACTICAL ENERGY CONSERVATION OF RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM BY DEVELOPING DISTRIBUTED CLUSTERING NEIGHBORHOODS IN SUBURBAN AREA

Takeyoshi KATO, Noriyuki KOBAYASHI, Hiroki TANIKAWA and Ichiro NARUSE

A large detached house suitable for photovoltaic power generation system (PVS) installation consumes more energy than small apartment house. Besides, inhabiting a detached house in suburban residential area consumes more transportation energy in daily life than urban inhabitation. Therefore, the contribution of PVS to the reduction in primary energy consumption should be evaluated by considering the future development of a compact city of less energy consumption in transportation and residential sectors. In this paper, we evaluate the substantial energy conservation effect of PVS installed in suburban detached house, taking into account the difference in both the residential and transport energy consumption by inhabitation area. As a result, because of less frequent vehicle use, the installation of PVS for the household with small number of family members would contribute to the reduction in the primary energy consumption of the suburban inhabitation compared with the urban inhabitation without PVS. The substantial energy conservation effect of PVS would be increased with the diffusion of high efficiency vehicle which reduces the difference in transportation energy consumption between urban and suburban inhabitation. 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.