

博士論文

人口構成の変化と建物配置を考慮した  
市街地地区におけるエネルギーシステム導入の長期的評価

渡邊 裕美子



# 目次

<b>1. 序論</b> .....	<b>5</b>
1.1. 研究の背景.....	5
1.1.1. エネルギー問題と人口減少・高齢化問題.....	5
1.1.2. 地域エネルギー政策への関心.....	6
1.1.3. 人口減少・高齢化の進展と地域.....	13
1.2. 研究の目的と構成.....	16
1.2.1. 問題の整理.....	16
1.2.2. 本研究の目的と主要な手法.....	18
1.2.3. 本論文の構成.....	21
<b>2. 地区のエネルギーサービス需要の分析</b> .....	<b>25</b>
2.1. 人口構成変化を考慮したエネルギーサービス需要推計モデルの構築.....	25
2.1.1. 本検討の目的.....	25
2.1.2. 構築したモデルの概要.....	26
2.1.3. 将来人口・世帯構成の推計.....	27
2.1.4. 個人の在宅・外出の推計.....	31
2.1.5. エネルギーサービス需要の推計.....	45
2.1.6. 本節のまとめ.....	50
2.2. モデルを用いた試算.....	53
2.2.1. パラメータの不確実性と感度.....	53
2.2.2. 住宅や地区におけるエネルギーサービス需要の長期変化の試算.....	57
2.2.3. 本節のまとめ.....	61
2.3. エネルギーサービス需要の長期的変化による影響.....	63
2.3.1. 住宅からの太陽光発電余剰電力の発生状況.....	63
2.3.2. 家庭用省エネルギー給湯システムの投資回収可能性の分析.....	71
2.3.3. 本節のまとめ.....	78
<b>3. 地区のエネルギーシステムの分析</b> .....	<b>80</b>
3.1. 建物配置を考慮したエネルギーシステムモデルの構築.....	80
3.1.1. 本検討の目的.....	80
3.1.2. 建物配置の生成モデルの構築.....	81
3.1.3. エネルギー需給の計算モデルの構築.....	87
3.1.4. 一連の計算手順.....	98

3.1.5.	建物配置の指標化.....	99
3.1.6.	本節のまとめ.....	104
3.2.	モデルを用いた試算.....	106
3.2.1.	対象地区.....	106
3.2.2.	建物配置の生成.....	106
3.2.3.	地区内エネルギー需給モデルの挙動.....	108
3.2.4.	本節のまとめ.....	117
3.3.	建物配置がエネルギーシステム選択に与える影響の分析.....	118
3.3.1.	建物配置とエネルギーシステムの選択.....	118
3.3.2.	人口減少下の地区のエネルギーシステム.....	133
3.3.3.	本節のまとめ.....	141
<b>4.</b>	<b>千葉県柏市を対象としたケーススタディ.....</b>	<b>144</b>
4.1.	分析の前提.....	144
4.1.1.	対象地区の概要.....	144
4.1.2.	分析の方法.....	147
4.2.	結果.....	150
4.2.1.	エネルギーサービス需要.....	150
4.2.2.	地区のエネルギー供給システム.....	152
4.3.	考察.....	155
4.3.1.	望ましいエネルギー供給システム.....	155
4.3.2.	望ましいエネルギー供給システムを実現するための方策.....	156
4.4.	本章のまとめ.....	158
<b>5.</b>	<b>結論.....</b>	<b>159</b>
5.1.	本研究の結論.....	159
5.1.1.	本研究のまとめ.....	159
5.1.2.	結論.....	161
5.2.	今後の課題と展望.....	162
	<b>発表文献.....</b>	<b>164</b>
	<b>謝辞.....</b>	<b>165</b>

# 1. 序論

## 1.1. 研究の背景

### 1.1.1. エネルギー問題と人口減少・高齢化問題

エネルギーの安定供給は、現代社会の根幹を支える不可欠な基盤の一つである。1970年代の石油危機に始まる化石燃料の価格上昇と技術進展は、種々の省エネルギーや再生可能エネルギー、非在来型資源利用などの技術の研究開発や普及を進めた。しかし、依然として従来の化石燃料も価格面また量面で優勢であり、発展途上国における長期的なエネルギー需要増加は引き続き化石燃料価格の上昇圧力となり続けている。

また、気候変動問題は、人類の経済活動に長期かつ多岐にわたる影響を及ぼす、重大な環境問題である。2014年に発表された「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)による第五次統合報告書[1]は、2000年から2100年の平均地表温度上昇を2°C以内に抑制するためには、世界全体で2050年ごろまでの温室効果ガス排出量をほぼ半減させる必要があるという排出経路を示している。とりわけ先進国においては、より野心的な温室効果ガス排出目標を掲げて世界全体の温室効果ガス排出削減を牽引することが期待されている。

日本では、石油危機以降に特に産業部門の省エネルギーが大きく進展した。2005年の気候変動枠組条約京都議定書発効以降は、その約束期間である2008年～2012年に向けた温室効果ガス削減取組みを実施し、2020年や2050年といった中長期的な削減についても議論が続けられてきた。2011年の東日本大震災は日本のエネルギー政策の再議論を引き起こしたが、短期的な問題の軽重の逆転はあっても、エネルギー安定供給と温室効果ガス削減は、日本が国家として取り組むべき課題であることには変わらない。

このような、国家としてのエネルギー供給安定・温室効果ガス排出削減の取組みの一方で、近年、省エネルギーや温室効果ガス削減を含めた、地域における取組みにも関心が集まっている。

2014年にとりまとめられた日本の「エネルギー基本計画」[2]の中には、「スマートコミュニティ」という言葉が登場し、「様々な需要家が参加する一定規模のコミュニティの中で、(中略)エネルギーの利活用を最適化するとともに、高齢者の見守りなど他の生活支援サービスも取り込んだ新たな社会システムを構築したものをスマートコミュニティという。」と述べられている。経済産業省では2010年から5年の間、4地域において「スマートシティ/スマートコミュニティ」実証試験[3]が開始されている<sup>1)</sup>。

一方、1997年に米国で創設されたスマートコミュニティに関する教育プログラム The World Foundation for Smart Communities における Smart Community の定義[4]では、

---

<sup>1)</sup> 実証試験の内容は、エネルギー使用の見える化、家電・給湯機などの制御、デマンドレスポンス、電気自動車と家の連携、蓄電システムの最適設計、電気自動車充電システムや交通システムなどのエネルギー技術が中心である。

技術として IT を駆使するという点、社会システムを抜本的に変化させるという点には共通項があるが、導入により対処しようとしている課題は特定されておらず、「グローバルな知識経済における課題」<sup>2</sup>と述べられている。

この Smart Community の汎用的な概念と、日本の「スマートコミュニティ」の取組みを比較すると、日本において特にコミュニティに期待されているものは、「エネルギーの利活用の最適化」を中心とし、「高齢者の見守りなど他の生活支援サービスも取り込んだ新たな社会システムの構築」である。すなわち、エネルギー安定供給や温室効果ガス排出削減と、人口減少・高齢化問題が、重要な課題として考えられていると言える。

エネルギー問題と人口減少・高齢化問題は、ともに数十年にわたる長期的な政策課題であるという点で共通している。しかし、全国的な社会保障制度に加えて地域における介護・福祉政策で対処を進めてきた高齢化問題に比べると、エネルギー問題が地域的課題として認識されたのはより新しく、多岐に亘る期待が「地域」に掛けられている状況である。

本章では本研究の背景として、地域におけるエネルギー政策への関心の高まりの背景について整理を行う。その後、人口減少・高齢化問題について、エネルギー問題との関わりを論じる。

### 1.1.2. 地域エネルギー政策への関心

本項では、近年高まっている地域のエネルギー政策への関心の背景となる議論を、スマート化技術の進展、エネルギー政策における都市・地方自治体の役割の認識、都市開発におけるエネルギーの面的利用への注目、経済効果・生活の質向上効果への期待、規制緩和の進展と地域エネルギー事業の可能性、の5つの観点から整理する。

これらは元来異なる背景から生まれきた論点であり、これらの観点の共通点と相違点を、特に想定されている「地域」の空間的範囲の点から明らかにする。なお、これらは相互的に関係する部分があり、これらを横断的に扱っている場合も多いため、取り上げる研究や実例は必ずしもそれぞれの観点のみからの取組みでないことを予め付言しておく。

---

<sup>2</sup> “A smart community is a community that has made a conscious effort to use information technology to transform life and work within its region in significant and fundamental rather than incremental ways. The goal of such an effort is more than the mere deployment of technology. Rather it is about preparing one's community to meet the challenges of a global, knowledge economy.” [4]

## (1) スマート化技術の進展

情報通信技術(ICT)を活用した地域のエネルギー需給の「スマート化」は、2000年代前後から注目を集めている。住宅や建築物からのエネルギー供給を可能にする太陽光発電や、オフピーク時の電力を利用して輸送を行う電気自動車や給湯を行うヒートポンプ式給湯器、インターネットと連携して情報収集や提供、制御を行うシステムなどの新たな技術も普及し始めたことも、これまでの個別機器における省エネルギーを超えた、横断的制御の可能性への期待を高めている。

経済産業省[5]は、「スマートコミュニティ」のイメージとして、家庭・ビル・地域のエネルギーの総合的管理、交通システムの最適化、電気自動車の活用、地域冷暖房や再生可能エネルギーの導入などの要素を挙げている(図 1-1)。

総務省[6]も、地域内の環境エネルギーセンター等における、地域内の施設・交通その他の情報の一元管理、地域内の発電設備・蓄電池・充放電・電力需要等の監視・運用・制御の一元管理、地域内のエネルギー、二酸化炭素、セキュリティ、防災等の情報の見える化・情報発信を行う地域づくりの方向性を掲げている(図 1-2)。

また、一般財団法人建築環境・省エネルギー機構による「スマートエネルギータウン調査」[7]では、自立・分散型エネルギーシステムの連携によるシステムの高機能化、ICTを活用した双方向・ネットワーク型エネルギーシステムの形成、再生可能・未利用エネルギーの大量導入、建築物のZEB(Zero Emission Building)化と連携したデマンドサイドの対策の推進、地域エネルギー消費者参加型市場の整備やプロシューマの確立を、地域スケールの「スマートエネルギーネットワーク」に期待される役割として整理している。



図 1-1 経済産業省によるスマートコミュニティのイメージ[5]

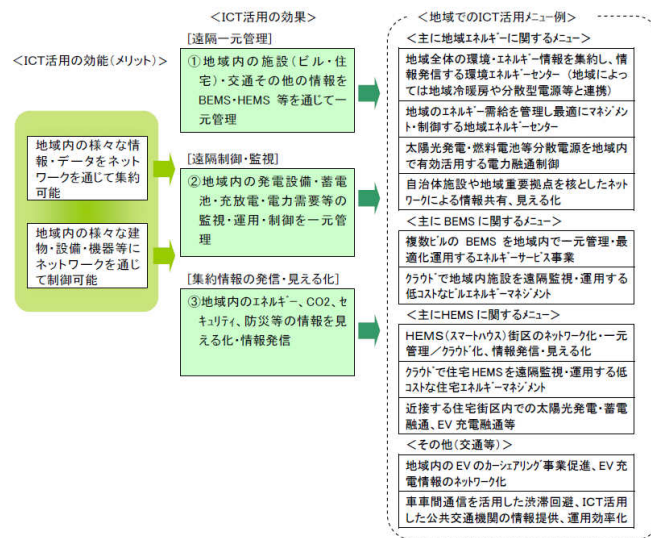


図 1-2 総務省による ICT システムの利活用による地域づくりの効果・効用のイメージ[6]

## (2) エネルギー政策における都市・地方自治体の役割の認識

エネルギー問題における「都市」の役割は、2000年ごろから国際的に着目され始めたトピックである。国際連合は、世界人口を予測したレポート[8]の中で、2050年までに世界人口の67%が都市部に居住することになると述べている。このような都市への人口集積は、エネルギー供給に加えて、上下水道、廃棄物、道路といった様々なインフラに関する課題を顕在化させる。

国際エネルギー機関(IEA)が毎年発行しているエネルギー需給の見通し“World Energy Outlook” [9]は、2008年に初めて「都市のエネルギー」をテーマとして取り上げ、都市におけるエネルギー政策の例として、地域熱供給などの使用による効率的・経済的なエネルギー利用の推進、歩道や自転車道の整備・土地利用政策・公共交通の導入などによる旅客の交通モードの変化、地方自治体は建築基準の導入等による建物のエネルギー消費の削減等が挙げられている。また、地方自治体が主導可能なエネルギー分野の政策として、Suzukiら[10]は、公共の建物・インフラ設備における省エネルギー・再生可能エネルギー利用への投資、建築物への規制強化等を通じた民間での省エネルギー・再生可能エネルギー利用の促進、土地利用計画を活用した省エネルギー・再生可能エネルギー利用の促進の3分野を挙げている。

このように、エネルギー問題における都市に対する期待としては、大きく

- ・ 物理的な人口集積地区としてエネルギー効率の高いシステムが適用可能である
- ・ 地方自治体の政策が及ぶ範囲として地域交通政策や土地利用政策に関連づけた省エネルギー対策が行える

の二側面が挙げられる。前者に関しては、次項で詳細に述べることとする。



後者に関し、地域や地方自治体が主体となって温室効果ガス削減を進めようという取り組みは、国内外で行われている。例えば、温室効果ガス排出の抑制を含む、持続可能な開発を公約した地方自治体の国際的団体である ICLEI (The International Council for Local Environmental Initiatives, 持続可能性をめざす自治体協議会)には、世界各国からの 1000 以上の自治体が加盟しており、国内でも東京都、京都市等の 19 都道府県・市区町村が会員となっている[11]。国内でも、内閣官房地域活性化統合事務局は、平成 20 年度に「温室効果ガスの大幅な削減など低炭素社会の実現に向け高い目標を掲げて先駆的な取組にチャレンジする「環境モデル都市」を選定し、支援を行っている[12]。また、「地球温暖化対策の推進に関する法律」においては、一定規模以上の地方公共団体は区域の温室効果ガスの排出抑制のための計画策定が義務付けられている。

しかし、自治体で実施されている地球温暖化対策は、特に中小規模であれば、自治体の財政力や計画性といった制約から、普及啓発などの「自治体の環境セクションが自前でできること」に限られている[13]。これは、地球環境やエネルギーに対する政策が、自治体が抱える他の課題に対して至急性が低いと見られていることの裏返しでもある。そもそもエネルギー供給は、サービス享受者から直接費用が回収できるためにインフラへのフリーライドが生じにくいと見られるため地方自治体として取り組む必要性が小さい分野であり、実際、エネルギーインフラの多くの部分が地方自治体の直接管轄範囲ではない[10]。また、地方自治体は地域交通政策には直接の実効力を持つが、土地利用政策には民間の利害関係者が多く、これらの性質の違いと協調の不足が都市計画政策における成功を限定的にしているとの指摘もある[14]。

日本では 2012 年に、「都市の低炭素化の促進に関する法律（略称：エコまち法）」が施行された。到来する人口減少・超高齢社会への対応、行政サービスコストの適正化、さらには地球温暖化問題への対応を目的に、日常生活に必要なまちの機能を住まいに身近なところに集積し、「住民が自家用車に過度に頼ることなく、公共交通によってこれらの機能にアクセスできるような「コンパクトなまちづくり」[15]を推進していくものである。

「コンパクトシティ」の概念は、もともと米国において機能分離を原則とした都市開発によるスプロール化への対処として 1970 年ごろに提唱され始め、欧州では伝統を活かした持続的発展の形として 1990 年ごろから注目が集まったもので、基本的にエネルギー問題や地球温暖化対策を目的としたものではない。いずれもコンパクト化を目指していることは共通しているが、欧州、米国、日本では抱えている課題の重要性が異なるため、具体的なコンパクトシティの様相には異なる部分がある（表 1-1）。欧州では歴史的価値を持つ市街地を維持することを目指しており、米国では成長限界線を設ける方法で都市圏の大きさを規制しようとしている。一方で、日本が目指すコンパクトシティは、歩いて暮らせるような身近な範囲へ生活施設を集積していこうとするものである。

表 1-1 国別の特徴と目指されるコンパクトシティの様相

	欧州	米国	日本
都市形態	都市と農村の区分、グリーンベルト 市街地活性化維持に比較的 成功	スプロール化 空洞化が極めて深刻	スプロール、都市と農村・ 自然の連続性 人口の大都市への流出による市街地空洞化
人口	緩やかに増加	増加	減少、高齢化
建物・居住	古い建物の持続、都市型住宅と田園生活	郊外戸建て、自動車への強い依存	短い更新サイクル 戸建と集合住宅
関心の高い持続可能性問題	農地保全 生物多様性維持 CO <sub>2</sub> 削減 持続的な社会の発展	野生生物環境保護 水源保全	自然保護 CO <sub>2</sub> 削減
財政への危機感	比較的小さい	比較的小さい	大きい
コンパクトシティの様相	伝統的市街地の維持、分散集中	スプロール規制（スマートグロース法）	市町村内の複数拠点周辺への集積

出所) [16]等より作成

このような「コンパクトシティ」は都市としての持続可能性のみでなく、省エネルギー対策や地球温暖化対策としても有効であることは、人口密度が高いほど一次エネルギー供給量が少ないという関係から例証されるとされている[17]。Newman ら[18]は 1989 年に、米国の都市と他国の都市の人口密度とガソリン消費量を比較した論文を発表し、この種の研究の先鞭をつけた。Kennedy ら[19]は世界 10 都市における陸上輸送に起因する温室効果ガス排出量を、Makido ら[20]は日本国内の都市における住宅からの温室効果ガス排出量を分析対象としている。

一方でこれらの例証に対して、結果の一般性の欠如、因果関係の不明確性、考慮されていない副作用の存在、といった視点からの反論も提示されている[21]。Clark[22]は、公共交通の利便性向上や、職住近接の推進（混合土地利用）を伴わなければ、過密による混雑は逆効果を引き起こす可能性を指摘している。Yamagata ら[23]は、戸建住宅が減少し集合住宅が増加すると、集合化によるエネルギー消費削減量よりも住宅用太陽光発電の設置可能性減少の影響が大きいと述べている。

このように、コンパクトシティの基本的な概念には賛同が得られているが、省エネルギー対策・地球温暖化対策として具体的に適用するためには政策手段を含めてまだ課題が多く、実証・モデル研究が行われている。

### (3) 都市開発におけるエネルギーの面的利用への注目

上述した「都市の低炭素化の促進に関する法律」に基づく「低炭素まちづくり実践ハンドブック」[24]では、都市構造の転換や公共交通分野での施策に加え、再開発や市街地機能更新などを契機とした、建物群や街区単位での省エネルギー・温室効果ガス排出削減対策を推奨している。具体的な技術として、エネルギーの面的利用（地域冷暖房の導入、建物

間熱融通)、未利用エネルギーの活用、再生可能エネルギーの活用が挙げられている。

地方自治体の建築物環境配慮制度にも活用されている建築環境総合性能評価システム「CASBEE」ファミリーには、建築群としての環境性能を評価する「CASBEE・まちづくり」[25]が用意されており、まちづくりにおける環境負荷低減性として、微気候・外部空間の環境影響、社会基盤（エネルギーの面的利用による電力・熱負荷の平準化、面的な航行率エネルギーの活用等が含まれる）、地域環境マネジメントの観点から評価されている。

街区や地区レベルでの低炭素化対策は、健康快適性や知的生産性の向上、経済・社会の活性化、非常時の業務・生活の維持につながるとされている。「スマートエネルギータウン調査委員会」[7]では、インフラ建設投資による経済波及効果、事業運営による経済波及効果、不動産価値上昇効果といった経済効果、さらに、環境価値創出による便益、リスク回避による便益、普及・啓発効果としての便益、執務・居住環境の向上による便益などをNEB(Non Energy Benefit)と総称している。また、2011年の東日本大震災以後、電力供給停止リスク回避のための自家発電・コジェネレーション導入が俄かに関心を集めた。

#### (4) 経済効果・生活の質向上効果への期待

地域での省エネルギー・低炭素化への取組みが、地域に経済効果をもたらすことへの期待もある。

国際都市では低炭素化への取組みは都市の競争力強化につながると考えられており、森記念財団都市戦略研究所が作成した世界の都市の競争力ランキング[27]においては、都市の力を表す主要6分野を、経済、研究・開発、文化・交流、居住、交通・アクセスに加えて「環境」（再生可能エネルギーの比率等を考慮）としており、また、2020年のオリンピック開催地決定においては、各候補が環境対策を競った。

再生可能エネルギー資源が豊富な一部の地域では、これらのエネルギー源の活用が地域活性化に繋がり得る。例えば、地域のバイオマス利用により、エネルギー費用が村落外へ流出するのを抑制し地域経済へ滞留させることができるだけでなく、地区コミュニティづくりの新たな展開への好機となることが期待されている[28]。経済産業省「平成25年度「再生可能エネルギー発電事業を通じた地域活性化モデル開発支援調査事業」」などのモデル事業が実施されている。学術的研究としては、都道府県別の産業連関表を活用し、再生可能エネルギー等の導入が地域に与える経済効果を分析した事例[29]などがある。

これらの直接的な経済効果に加えて、エネルギー供給・消費方法の変更による生活の質向上効果も生じ得る。なお、「経済活性化」は元来、「地域経済の側面だけでなく地域社会や文化の側面で、地域独自の活力を高めること」[30]、または「日常的行為によって達成される水準を超える付加価値（所得の向上、生活充足度の向上、環境の質の向上）を達成する動き」[31]と定義されているように、地元産業・雇用の創出などに留まらない、住民の生活に直結するソフト面での効果を重視した概念である。

エネルギー供給方法の変更による生活の質向上の一例としては、ボイラ燃料を石炭からガス等に変更することで地域環境を改善するなどの効果である。エネルギー消費がもたらす効用に対する需要を「エネルギーサービス」と呼ぶが、日本ではエネルギーサービス需要の多くが既に一定の大気汚染を引き起こしにくい燃料で供給されているため、地域住民の生活改善余地はあまり大きくない。一方で、過疎地のガソリンスタンド維持のために助成を行っている自治体もある[32]ように、人口減少という別の問題によりエネルギー供給・消費に起因する生活の質の低下が生じている。このような地域において例えば、ガソリン自動車ではなく電気自動車を利用すること、灯油暖房でなく電気暖房を行うことは、エネルギーキャリア入手のための住民のコストを削減し、地域住民の生活の質を引き上げる可能性がある。

英国では、平均以上の暖房燃料費用を必要とし、かつその費用を除いた収入が国の定める貧困基準以下となる世帯を「燃料貧困」(fuel poverty)にあると定義し、住宅断熱強化等の支援策を行っている[33]。このように、エネルギー政策には、最低限のサービスの供給による生活水準確保という目的もある。

#### (5) 規制緩和の進展と地域エネルギー事業の可能性

また、東日本大震災時の電力供給の混乱を受け、電力、またガス事業の規制緩和に向けた検討が進展している。規制緩和が行われた際には、電力・ガス事業の垣根を越えた事業が可能となるといわれている。

ドイツでは、地域の電力・熱・ガス供給、上水道、市内交通、公共施設管理などのインフラ事業を行う「シュタットベルケ」と呼ばれる事業体が存在する。単体事業のみを行う事業体もあるが、電力供給（配電）と熱供給・省エネルギー事業など幅広く複数の事業を行う事業体もあり[34]、規制緩和による事業者間競争が進んでも、このような地域密着の事業体は一定の競争力を有しているために淘汰されにくい[35]。これを受けて、日本のエネルギー事業規制緩和の際にも、このような地域密着型の統合的なエネルギー事業の可能性があると指摘されている。

### 1.1.3. 人口減少・高齢化の進展と地域

以上では、地域のエネルギー政策に関心が持たれている背景を述べたが、その中でも言及したように、これらの議論には日本が直面している人口減少・高齢化問題にも起因する問題意識も含まれる。

国立社会保障・人口問題研究所が行った推計[36]によれば、2010年の総人口は約1億2,800万人であるが、出生中位・死亡中位では、2050年頃に人口は1億人を割り、2060年には約8,700万人まで減少すると予測されている。65歳以上人口（老年人口）は増加するが、15～64歳人口（生産年齢人口）と14歳以下人口（年少人口）の減少が著しく、この結果、高齢化率（全人口に占める65歳以上人口の割合）は現在の約25%から40%へ増加すると見込まれている。

以降では、全国的にも生じている人口減少・高齢化が地域に与える影響について、インフラ整備<sup>3</sup>への影響と、コミュニティの存続危機の観点から述べる。

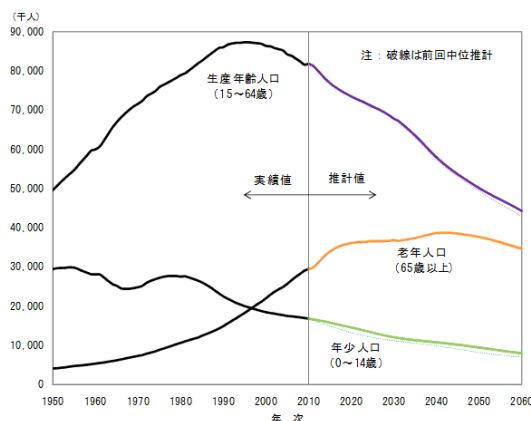


図 1-3 年齢3区分別人口の推移—出生中位(死亡中位)推計— [36]

#### (1) インフラ整備への影響

国内の公共社会資本約786兆円[37]（ここにはエネルギーインフラは含まれない）に対し、民間が保有するエネルギーインフラ資本ストック量は約14兆円[38]と、1割強の規模に相当する。一般にインフラ整備・維持費には規模の経済性があるため、人口が減少すれば一人当たり負担は増大する。人口減少による影響は必ずしも直接的・比例的に生じるわけではなく、人口減少の速度や空間分布、人口構成等も重要な要素である[39]。

現在、エネルギーは、道路などに比べて空間的な不公平性の小さいインフラである。ただし、配電・配管といった設備のイニシャル部分については、特定の消費者のためのインフラを維持するためのコストが大きくなる場合がある。同一のエネルギーサービスを同一の金額で満たしつつ、インフラコストを縮減する可能性がある。例えば、人口過疎の地域

<sup>3</sup> 例えば法制度・教育なども「インフラ」に含む場合があるが、ここでは物質的な社会基盤のみを対象とする。

では個別分散型のエネルギーシステムを、そうでない地域には集中ネットワーク型のエネルギーシステムを導入する方法である。山崎[40]は、1時間圏内に地方都市はあるが日常圏には高度なサービス享受が困難な地域を「低密度居住地域」と定義し、「分散型の燃料電池、マイクロガスタービン、太陽電池、風力発電、太陽熱温水器、バイオマスなど、新しい技術を積極的に低密度居住地域に導入することが望ましい」と述べている。低密度居住地域に適したインフラ整備という観点からは、例えば教育・医療についてはインターネットの活用、下水処理については浄化槽方式の適用などの例も挙げられている（表 1-2）。

表 1-2 居住密度により異なるインフラ整備のイメージ

	高密度居住地域	低密度居住地域
教育	学校	通信教育
医療	病院	遠隔医療
下水処理	下水道	浄化槽
遠距離交通	鉄道	航空機
エネルギー	ネットワーク型	分散型

文献[40]を参考に作成。

## (2) コミュニティの存続危機

全国的な少子化は、今後いずれの地域においても人口減少を経験する可能性があることを示している。

日本の市区町村別将来人口の推計[41]によれば、2010年～2035年の25年間で全国的な人口減少率は約15%である一方、多くの自治体が2割以上の人口減少を経験することになる（図 1-4）。住民の入れ替わりが少ない住宅地では、既に急速な住民の高齢化が進展していることも指摘されている[42]。年間の供給戸数の限定による継続的な分譲などの工夫を行った住宅地では全体では高齢化が抑制されている例もあるが[43]、全体としては図 1-5 で示したように大部分の地域での人口減少は避けられない。

人口減少により徒歩圏内での生活利便施設（生鮮食料品店、病院等）が撤退し、アクセス可能性が低下することが指摘されている[44]。同様のことが、ガソリンスタンドなどのエネルギーインフラの整備においてもあてはまり得る。

1km<sup>2</sup>毎の地点に対する分析[44]では、2010年～2050年の全国的な人口減少率約25%に対して、これを上回って人口が減少する地点が現在の居住地域の9割以上を占め、人口が半分以下になる地点も6割に達すると予測されている（図 1-5）。

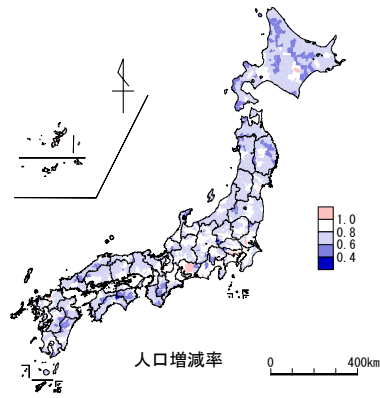


図 1-4 市町村規模別の人口増減率(2035年/2010年)

出所) [41]より作成

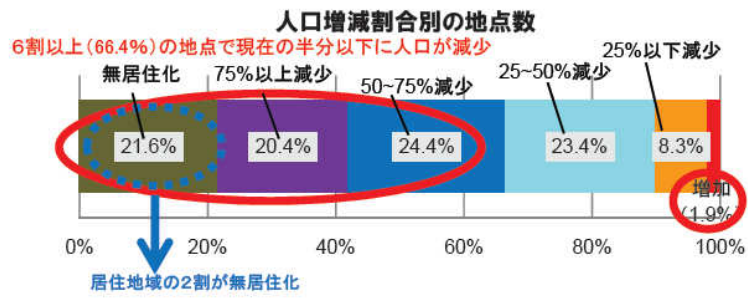


図 1-5 1km<sup>2</sup>地点での人口増減率(2050年/2010年)[44]

## 1.2. 研究の目的と構成

### 1.2.1. 問題の整理

#### (1) 問題意識

以上で、地域とエネルギー政策や人口減少・高齢化問題の関わりにおける議論を俯瞰した。温室効果ガス削減の国際的要請や長期的な化石燃料資源価格上昇に加え、日本では、少子化による人口減少、地方都市における中心市街地の衰退、東日本大震災による電力需給逼迫の経験などを背景に、コンパクトシティ・スマートシティ等のキーワードとともに、地域への着目が高まっている。

地域のエネルギー政策が、低炭素化のみでなく、防災、高齢者対応、経済効果など複数の効果を同時にもたらすものとして期待されており、具体的な技術として熱電併給といったものが挙げられている。しかし、今後あり得るその他の選択肢に比較してより優れているかどうかについての評価はあまりなされていない。例えば、防災なら防災、低炭素化なら低炭素化に特化した技術を組み合わせることのほうが、効果的である可能性がある。このため、地域のエネルギー政策の、エネルギー需給そのものに与える効果に着目した効果を定量的に示すことが必要である。

#### (2) 地域の定義

エネルギー問題を含む様々な地域の課題の解決につながるものと期待されているが、対象となる課題の発生範囲は幅広く、「地域」との一括りにより問題の所在と本質がかえって曖昧になりがちである。前節までで挙げた「地域」における論点を、対象とする空間範囲の違いにより整理したものを図 1-6 に示す。

例えば、地域での人口減少・高齢化が課題になっているという指摘は、自治体におけるインフラ整備費用の点から論じられるときもあれば、より狭い特定の住宅地の高齢化が問題と捉えられている場合もある。地域のエネルギー需給は、政策実行の点からは市区町村という基礎自治体が単位となるが、具体のエネルギー技術導入はより限られた地区や街区単位での検討を行う必要がある。



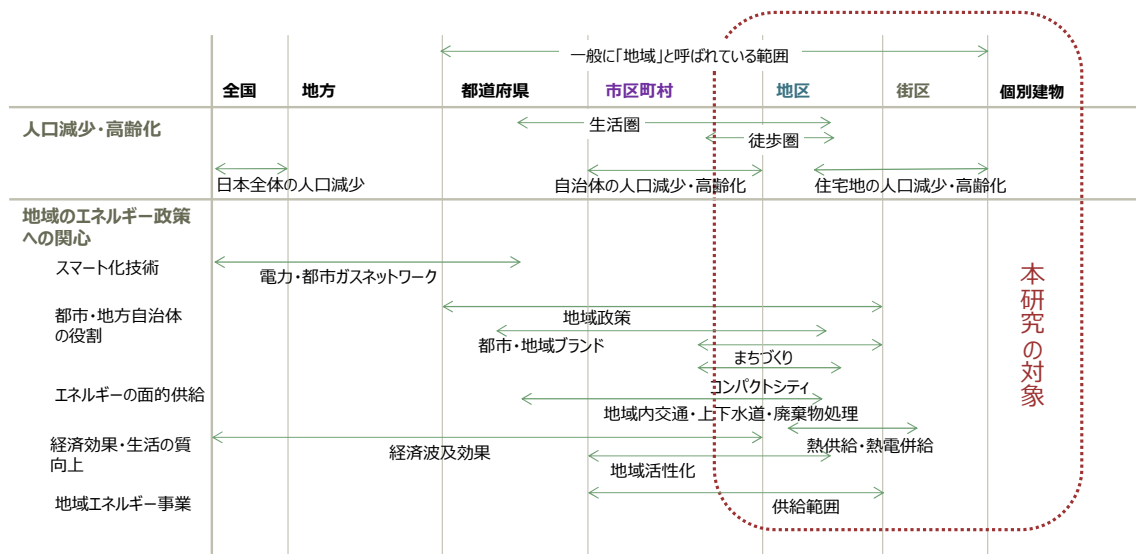


図 1-6 空間的広がりを表す言葉の定義

この議論をより具体的に行うにあたっては、まず、検討対象とする地域のスケールを定義する必要がある。例えば、鉄道や道路といった交通インフラの議論における「地域」は、地方自治体を超えて、東京都市圏、中京都市圏といったスケール感で議論されるが、学校などのインフラは、地方自治体のさらに内部に存在する「地区」スケールで議論されるものである。

エネルギーであれば、移動に伴うエネルギー需要であれば、地方自治体程度のスケール感の議論が有効である。一方、建物等で発生するエネルギー需要は、既存のネットワーク状況や輸送費用等の違いから、エネルギーキャリア別に特徴が異なる。既に全国でのネットワークが整備され、ネットワーク規模が大きいほど需給整合が図りやすくなる電力には、地域を区切って議論する必要性は小さい。都市ガスは、輸送効率は高いが配送の費用は高いため、幹線ネットワークからの距離によって合理的な供給範囲が定まる。

地域のエネルギー需給を考える際に、このような地域の捉え方の範囲の違いによって、検討すべき技術が異なってくる。これを表 1-3 に示す。

表 1-3 地域の範囲と適用可能なエネルギー技術の例

範囲	エネルギー技術	主体
建物～街区	自家発電・蓄電池等を用いた災害時のエネルギー供給	建築主、ディベロッパー
建物～地区	地点・地域熱供給の導入	建築主、ディベロッパー
地区～市区町村 (農山村)	バイオマス収集・利用	地域コミュニティ(町会等)、 地方自治体
地区～市区町村	コミュニティ内交通	地方自治体

### (3) 評価の観点

国のエネルギー需給構造の観点は「3E+S」(Energy (security), Economy, Environment, Safety)と表される。「3E」に対応する地域のエネルギーシステム導入の評価の観点として、「(災害時等を含む)供給の安定」「経済的負担の削減」「二酸化炭素排出量の削減」が挙げられる。

このうち、経済的負担の削減と二酸化炭素排出量の削減は、いずれも省エネルギー（一次エネルギー供給の削減）によって正の効果を受ける。一方で、エネルギー種別の熱量あたりの単価と二酸化炭素排出原単位の間にはトレードオフの関係が生じることもある。

一次エネルギー供給量は、以下の要因に分解することができる。

- ・ 一人あたりのエネルギーサービス需要
- ・ エネルギーサービス需要あたりの最終エネルギー消費量
- ・ 最終エネルギー消費量あたりの一次エネルギー供給量

地域における一次エネルギー供給の削減においても、この4つの要因それぞれの削減に働きかけるアプローチが可能である。例えば、都市の稠密性は一人あたりの移動需要を削減し、また集合住宅での居住は暖房需要を削減する可能性がある。大規模なほど効率向上や単価低減が見込める設備を導入・共用することで、最終エネルギー消費量や一次エネルギー供給量を削減する可能性がある。

#### 1.2.2. 本研究の目的と主要な手法

本研究では、以下に着目した分析を行うことで、地域におけるエネルギーの議論に対する検討材料を提供することを目的とする。

### (1) 空間範囲

本研究で対象とする「地域」の空間範囲は、数キロメートル四方の範囲、すなわち図 1-6 中で示す「地区」よりやや広い範囲とする（ただし、以降の文中ではこの範囲を「地区」と称することとする）。また、地方都市の駅周辺など、比較的人口の集中している「市街地」を対象とする。

この理由は以下のとおりである。

- ・ 地域のエネルギーシステムとして熱エネルギーの活用への期待が高いが、配送にコストとエネルギーロスが伴う熱エネルギーは、地区や街区の範囲での活用を検討することが効率的である。
- ・ エネルギーシステムを実装するには都市再開発が一つの単位となる。
- ・ 概ね日常生活圏に合致し（介護分野等では学校区を日常生活圏と呼ぶ。ただし、30分～60分移動域を日常生活圏と捉えることもある[45]）、通勤を除けば移動がある程度内部的に発生する。
- ・ 特定の地区での人口減少・高齢化の影響は、より広範囲で見たときの影響よりも大

きい可能性がある。

「市街地」に類する定義として、「DID（人口集中地区）」<sup>5</sup>があり、これに関する統計を用いて日本の市街地の状況を示す。

平成 22 年度の国勢調査[46]によると、全国の人口集中地区の数は約 1200 である。その面積別、人口別の分布を図 1-7 に示す。広範囲に連なり多数の人口を抱えている人口集中地区がある反面、数として多いのは、面積では数～数十 km<sup>2</sup>、人口では 50 万人以内の地区である。特に本研究が対象としているのは、図 1-7 の枠内で示したような地区であり、全人口集中地区の半数を占めている。なお、人口集中地区の定義上ではこれを超えるような大都市圏であっても、部分的に見れば本研究の議論が当てはまる場合がある。

例として、千葉県内の人口集中地区を図 1-8 に示す。

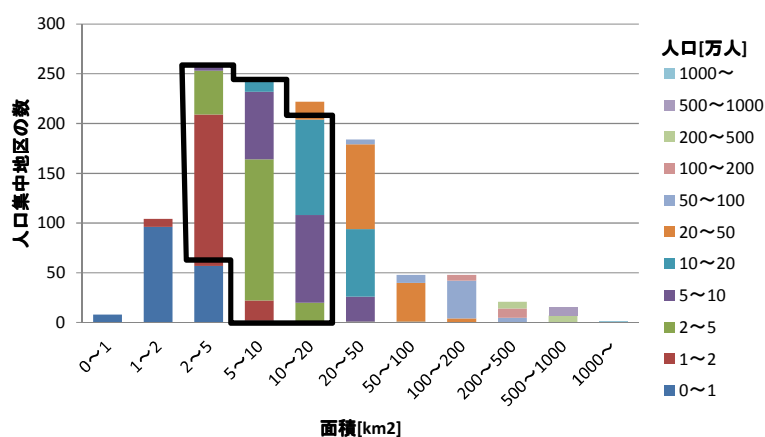


図 1-7 人口集中地区の分布

文献[46]より作成。枠内が本研究で対象とする地域。

<sup>5</sup> 「国勢調査基本単位区及び基本単位区内に複数の調査区がある場合は調査区（以下「基本単位区等」という。）を基礎単位として、1)原則として人口密度が1平方キロメートル当たり4,000人以上の基本単位区等が市区町村の境域内で互いに隣接して、2)それらの隣接した地域の人口が国勢調査時に5,000人以上を有するこの地域。」また、基本単位区は「基本単位区の区画方法は、街区方式による住居表示を実施している地域については、原則として街区を、それ以外の地域については街区に準じた小区画」であり、街区とは「市区町村内を町丁単位に分け、その中を更に道路、河川等によって区画し、番号化するもの」。<sup>[5]</sup>

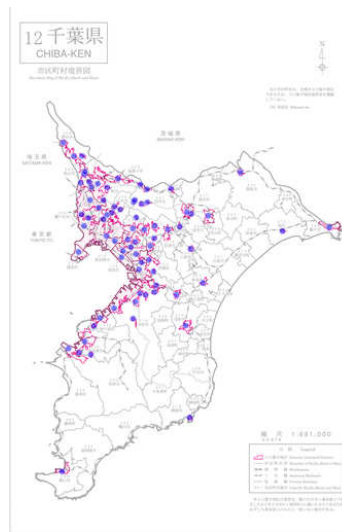


図 1-8 千葉県の人口集中地区境界図(平成 22 年)[47]

## (2) 分析・評価項目

対象とする地区の範囲内で長期的に望ましいエネルギーシステムを、建物配置や人口減少・高齢化の影響を踏まえた上で評価する。人口減少・高齢化等の影響も含めた長期的なエネルギー需要変化やそれにより発生する経済的負担、環境負荷を評価対象とし、短期的な影響（例えば天災による停電、ガス供給停止等）に対する頑健性・回復力は直接には考慮しない。

具体的には、以下の 2 側面からの評価を行うことを目的とする。

1. 地区の「エネルギーサービス需要」に着目し、地区内のエネルギーサービス需要の、人口減少・高齢化の影響を踏まえた上での変化を把握する。
2. 地区内の建物配置の違いによる、望ましい「エネルギー供給方法」（エネルギーシステム）の違いの有無について把握する。

## (3) 主要な手法

人口減少・高齢化や地区内の建物配置が、エネルギーサービス需要やエネルギー供給方法に与える影響を定量的に議論するため、モデル分析を利用した。

エネルギーサービス需要を推計するために、将来人口・世帯数、個人の在宅・外出行動を推計し、これをもとにエネルギーサービス需要を推計するシミュレーションモデルを構築した。また、地区におけるエネルギーシステムの分析のために、地区内の仮想的な建物配置を生成するシミュレーションモデル、望ましいエネルギーシステムを計算するための最適化型エネルギーモデルを構築した。

### 1.2.3. 本論文の構成

本論文の構成を図 1-9 に示す。

第 2 章では、世帯や地区レベルでの、人口減少・高齢化による「エネルギーサービス需要」への影響についての分析を行った。将来人口・世帯数、個人の在宅・外出行動を推計し、これをもとにエネルギーサービス需要を推計するシミュレーションモデルを構築した。これを用いて、世帯や地区レベルでの長期的なエネルギーサービス需要の変化を推計し、このような需要変化が、太陽光発電の余剰電力発生量や、家庭用給湯エネルギーシステムの投資回収可能性に与える影響を分析した。

第 3 章では、第 2 章でのエネルギーサービス需要の長期的変化を踏まえつつ、地区内の建物配置の違いによる、望ましい「エネルギー供給方法」についての分析を行った。地区内の仮想的な建物配置を生成するシミュレーションモデル、望ましいエネルギーシステムを計算するための最適化型エネルギーモデルを構築した。また、建物配置の定量化としての建物配置の指標を示した。これを用いて、建物配置や人口減少条件が地区のエネルギーシステムの実現に与える影響を分析した。

第 4 章では、以上の手法を用いて、千葉県柏市を対象としたケーススタディを行った。

第 5 章では、本研究の結論と今後の課題・展望を述べている。

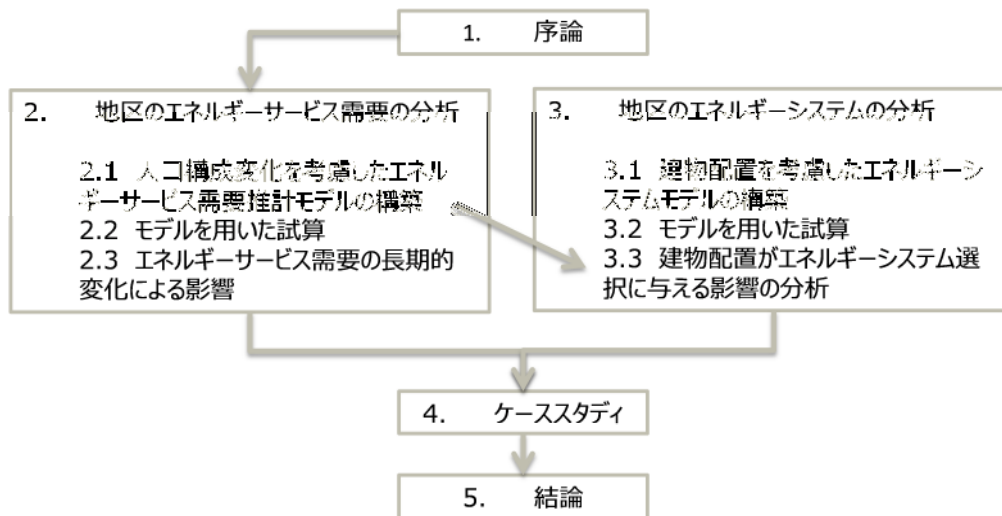


図 1-9 本論文の構成

## 参考文献

- [1] IPCC, “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2014.
- [2] 閣議決定, 「エネルギー基本計画」, 平成 26 年 4 月.
- [3] Japan Smart City Portal, Available: <http://jscp.nepc.or.jp/> (アクセス日 2013.6).
- [4] The World Foundation for Smart Communities, <http://www.smartcommunities.org/index.php>. (アクセス日 2014.4).
- [5] 経済産業省, 「スマートグリッド・スマートコミュニティについて」, Available: [http://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/smart\\_community/](http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/smart_community/) (アクセス日 2014.1).
- [6] 総務省, 「ICT を利活用した環境にやさしいまちづくり」, 2011.
- [7] スマートエネルギータウン調査委員会, 「持続可能な都市・地域づくりに貢献する分散型エネルギーシステム・スマートエネルギーネットワーク—多様な間接的便益 (NEB) を考慮した事業スキームの構築に向けて—」, 2012 年 6 月.
- [8] United Nations, World Urbanization Prospects, The 2011 Revision. New York, United States: United Nations, 2011.
- [9] OECD International Energy Agency, World Energy Outlook 2008. Paris, France: IEA, 2008
- [10] Hiroaki Suzuki, Arish Dastur, Sebastian Moffatt, Nanae Yabuki, Hinako Maruyama, Eco2 Cities: Ecological Cities as Economic Cities. Washington, United State: The World Bank, 2010.
- [11] ICLEI Global, Available: <http://www.iclei.org/> (アクセス日 2014.5).
- [12] 内閣官房地域活性化統合事務局, 「環境モデル都市・環境未来都市」, Available: <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kankyo/> (アクセス日 2014.5).
- [13] 中口毅博, 「市区町村の地球温暖化対策の実施パターンと類型化に関する研究—2008 年の全国市区町村の対策実施状況に基づく分析—」, 環境科学会誌 23(4), pp.297-306, 2010.
- [14] William P. Anderson, Pavlos S. Kanaroglou, Eric J. Miller, “Urban Form, Energy and the Environment: A Review of Issues, Evidence and Policy”, Urban Studies, Vol. 33, No. 1, pp7-35, 1996.
- [15] 国土交通省, 「エコまち法制定の背景」, Available: [http://www.mlit.go.jp/toshi/city\\_plan/eco-machi-haikei.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/eco-machi-haikei.html) (アクセス日 2014.5).
- [16] 海道清信, 「コンパクトシティの計画とデザイン」, 2007.
- [17] OECD, Compact City Policies: A comparative Assessment, OECD Green Growth Studies: OECD Publishing, 2012.
- [18] P. Newman, J. Kenworthy, “Gasoline consumption and cities: A comparison of U.S. cities with a global survey,” Journal of the American Planning Association, Vol. 55, pp. 24–37, 1989.
- [19] C. Kennedy, J. Steinberger, B. Gasson, Y. Hansen, T. Hillman, M. Havranek, D. Pataki, A. Phdungsilp, A. Ramaswami, G.V. Mendez, “Greenhouse gas emissions from global cities,” Environmental Science and Technology, Vol. 43, pp. 7279–7302, 2009.
- [20] Y. Makido, S. Dhakal, Y. Yamagata, “Relationship between urban form and CO2 emissions:

- Evidence from fifty Japanese cities,” *Urban Climate*, Vol. 2, pp. 55–67, 2012.
- [21] M. Neuman, “The compact city fallacy,” *Journal of Planning Education and Research*, 25, pp. 11–26, 2005.
- [22] T. A. Clark, “Metropolitan density, energy efficiency and carbon emissions: Multi-attribute tradeoffs and their policy implications,” *Energy Policy*, Vol. 53, pp. 413–428, 2013.
- [23] Yamagata Y, Seya H. Simulating a future smart city: An integrated land use-energy model. *Applied Energy*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.061>.
- [24] 国土交通省都市局都市計画課「低炭素まちづくり実践ハンドブック」, 平成 25 年 12 月.
- [25] CASBEE 建築環境総合性能評価システム, 「CASBEE-まちづくり の概要」, [http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas\\_ud.htm](http://www.ibec.or.jp/CASBEE/cas_ud.htm), (アクセス日 2014 年 4 月).
- [27] 一般財団法人森記念財団 都市戦略研究所, 「世界の都市総合力ランキング Global Power City Index 2013」, 2013.
- [28] 浦上健司, 糸長浩司, 「木質バイオマスエネルギーの地産地消を通じた持続可能な農山村地域づくりの展望—飯館村の地産地消—」, *農村計画学会誌*, Vol. 26, No. 3, 2007.
- [29] 石川良文, 中村良平, 松本明, 「東北地域における再生可能エネルギー導入の経済効果: 地域間産業連関表による太陽光発電・風力発電導入の分析」, *RIETI Policy Discussion Paper Series 12-P-014*, 2012.
- [30] 農業土木学会, 「農業土木標準用語事典」, 改訂 5 版, 2003 年 1 月.
- [31] 目瀬守男, 「地域資源を生かした地域活性化と住民参加型の地域計画手法 (SS 法) の開発」, *岡山大学農学部学術報告*, Vol. 87, pp215-225, 1998.
- [32] 資源エネルギー庁, 「石油製品の安定供給に向けた取組について (平成 24 年度北海道地域灯油意見交換会)」, 平成 24 年 11 月.
- [33] 英国政府, “Helping households to cut their energy bills”, Available: <https://www.gov.uk/government/policies/helping-households-to-cut-their-energy-bills>
- [34] 小川拓哉, 「エネルギー自治に向けて地域で成すべきこと～農山漁村における分散自立型エネルギー供給の実現のために～」, *MURC 政策研究レポート*, 2012 年 5 月.
- [35] 松井英章, 「電力自由化と地域エネルギー事業—ドイツの先行事例に学ぶ—」, *JRI レビュー* 2013 Vol.9, No.10, 2013.
- [36] 国立社会保障・人口問題研究所, 「日本の将来推計人口 (平成 24 年 1 月推計)」, 2012.
- [37] 内閣府, 「社会資本ストック推計の方法と部門別・都道府県別の結果の概要」, 2012.
- [38] 内閣府, 「国民経済計算 民間企業資本ストック」.
- [39] 植村哲士, 「人口減少とインフラ背景と問題」 pp1-32. 宇都正哲, 植村哲士, 北詰恵一, 浅見泰司, 編, 「人口減少下のインフラ整備」, 東京大学出版会, 2013.
- [40] 山崎朗, 「人口減少自体の地域政策」 pp127-143, 塩見英治, 山崎朗 編, 「人口減少化の制度改革と地域政策」, 中央大学出版部. 2011.
- [41] 国立社会保障・人口問題研究所, 「日本の市区町村別将来推計人口 (平成 20 年 12 月推計)」, 2008.
- [42] 荒井良雄, 江崎雄治, 長沼佐枝, 「少子高齢化における地方中核都市の人口構造の特質と住宅市場の将来像」, 財団法人第一住宅建設協会, 2007.
- [43] 深見かほり, 大槻敏雄, 「ユーカーリが丘ニュータウンの人口動態に関する考察」, 日本建

築学会大会学術講演梗概集, 2007.

[44] 国土審議会政策部会 長期展望委員会, 「国土の長期展望」中間とりまとめ, 2011.

[45] 21世紀生活圏研究会, 「21世紀生活圏研究会中間整理」, 2008年5月29日.

[46] 総務省, 「平成22年度国勢調査」.

[47] 総務省, 「平成22年国勢調査人口集中地区境界図」.

<http://www.stat.go.jp/data/chiri/gis/index.htm>



## 2. 地区のエネルギーサービス需要の分析

### 2.1. 人口構成変化を考慮したエネルギーサービス需要推計モデルの構築

本節では、地域内の人口構成の変化がもたらすエネルギー需要変化を推計するためのモデルを提案する。これは、設備の設置・更新計画を含む長期的な視点からエネルギー供給を検討するための基礎となるものである。

#### 2.1.1. 本検討の目的

##### (1) 先行研究の状況

日本全体を対象にした長期的なエネルギー需要の予測には、実質民間最終消費、一人当たり所得等の経済指標の共通前提から、家庭部門、業務部門、輸送部門の需要を推計する[48]という、トップダウンの推計方法が用いられている。しかしこの方法では、地域でのエネルギー需要を推計することは困難である。一方、家庭内の個人行動に着目したボトムアップの推計方法として、世帯類型別に世帯構成員の行動を精密にシミュレーションすることで各家庭のエネルギー需要を推計する研究[49]が進んでいる。

ところで、地域での省エネルギーや二酸化炭素削減方策の検討を行うにあたっては、従来行われている業務・家庭・輸送といったエネルギー需要の部門毎把握のみでなく、部門間の関連性の考慮も重要である。従来異なる部門として分類されている家庭・輸送・業務のエネルギー需要は、一次的には在宅・外出・就業等といった個人行動に起因するものであり、限られた地域・人口範囲を対象とした際には個人行動の積み上げとしての特徴が顕れやすくなるためである。さらに近年、家庭でのエネルギー供給を可能とする太陽光発電や、家庭の電力消費で輸送部門の需要を充足する電気自動車といった新技術が普及しつつあることも、部門横断の検討の必要性を高めている。家庭部門と輸送部門の組み合わせでは、個人行動と、移動に関する統計データとの組み合わせからエネルギー需要を推計するための予備検討例[50]がある。また、ある地方都市を対象として、コンパクトシティ政策（都市機能の地理的集約）により生じる、戸建住宅から集合住宅への移住によるエネルギー消費原単位削減と、移動需要削減によるエネルギー消費量削減の評価を行った例[51]等がある。また、住宅や地域の居住者の年齢構成変化により、核家族世帯が新築住宅に設置した太陽光発電パネルが子供の独立後に多くの余剰電力を発生したり、高齢化に伴う家庭内のエネルギー需要構成の変化によりエネルギー供給システムの優劣が逆転したりする[52]可能性が指摘されている。

しかし、これらの先行研究は、時間単位での需要変化の分析には至っていないため、例えば電気自動車と太陽光発電の連携、地域熱供給の可能性といったエネルギーシステムを評価するには時間的解像度が十分でない。また、本研究の着眼点である、地区の人口減少や高齢化に焦点を当てた検討は為されていない。

## (2) 本検討の対象と特徴

そこで本検討では、地域での長期的なエネルギーマネジメントを検討するための基礎となる、地域におけるエネルギーサービス需要の長期的変化のシミュレーションモデルを作成する。なお、「エネルギーサービス需要」とは、最終エネルギー消費に機器効率を乗じることで、エネルギー消費機器が供給するサービス（暖房、給湯等）を表す。

対象は、空間的には、単一の住宅から、都市開発単位や地域熱供給の導入可能性を鑑みて数平方キロメートル程度までの範囲を想定する。時間的には、2010年から2060年まで5年毎の長期変化を対象とし、各年で季節毎・1時間毎の需給を推計する。本モデルの特徴は、地区の住民の年齢構成変化を考慮した点と、個人行動に着目することで家庭・業務・輸送部門間での整合性を図った点である。

### 2.1.2. 構築したモデルの概要

#### (1) 将来人口・世帯構成の推計

将来のエネルギーサービス需要の変化は、各地区の年齢構成、土地利用変化、その他ライフスタイル等の様々な要因が影響する。このなかでも年齢構成の変化による需要への影響把握を行うために、将来の人口・世帯構成を推計するための「人口・世帯動態モデル」を構築した。

#### (2) 個人の在宅・外出の推計

個人の在宅・外出といった行動を表現可能にするため、地区間の交通を表現する「個人行動モデル」を構築した。在宅時や外出先滞在時における行動は先行研究[49]等で詳細な検討が為されているが、ここでは家庭・業務・輸送部門を横断する個人移動に焦点を当てた。交通のモデルに関する先行研究ではパーソントリップ調査と呼ばれる統計調査をもとに推計を行うことが通例である。本研究では、東京都市圏交通計画協議会により平成20年度に実施されたパーソントリップ調査[53]をもとに「人の流れプロジェクト」[54]において整備された東京都市圏におけるデータ（人の流れデータセット）を利用することで、移動のみでなく在宅・外出先滞在の状況を表現した。

#### (3) エネルギーサービス需要の推計

個人の行動を部門毎のエネルギーサービス需要に結び付け、これを集約することで地域の需要をボトムアップで推計した。特に家庭部門の推計に当たっては、大きな比率を占める冷暖房・給湯が切り分けられ、かつ可能な限りシンプルな方法を採用した。

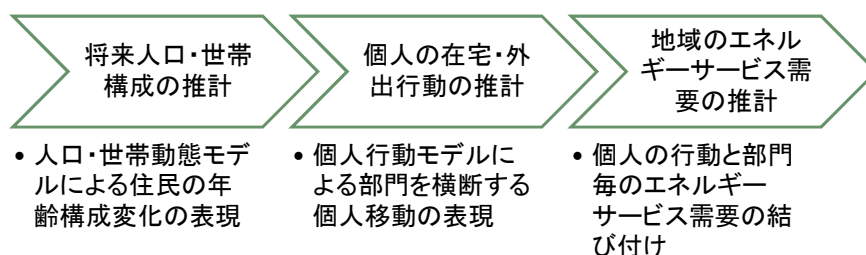


図 2-1 手法のフロー

### 2.1.3. 将来人口・世帯構成の推計

#### (1) 概要

国立社会保障・人口問題研究所が行っている市町村別将来人口推計[41]では、年齢構成別の人口や世帯数は示されているものの、家庭のエネルギー需要に影響を与え得る詳細な世帯類型別や世帯構成員の職業等の情報は含まれていない。

そこで、地域の初期の全個人プロフィール（年齢・性別・既婚/未婚）と全世帯プロフィール（どの個人が属しているか）を生成した上で、将来人口推計手法であるコーホート（出生年別集団）要因法の考え方をを用いて世帯構成の変化を推計するための、「人口・世帯動態モデル」を構築した。

#### (2) 初期の世帯プロフィールの生成

初期の世帯プロフィールの生成は、以下の手順による（図 2-2 にフローチャートでも示す）。 $\alpha_1 \sim \alpha_5$ はパラメータであり、先行研究による推計[55])に整合するよう設定する。

- 1) 年齢・性別人口構成、年齢別既婚率を元に、 $p$ 番目の個人プロフィール（年齢・性別・既婚/未婚）を、乱数を用いて決定する。
- 2) 乱数を発生させる。乱数が $\alpha_1$ 以下であれば、3)へ。そうでなければ4)へ。
- 3)  $p$ 番目の個人は既に生成されている世帯に組み入れる。
  - 3-1) 再び乱数を発生させ、既に生成されている世帯 $f$ を選択する。
  - 3-2) 世帯 $f$ の世帯構成員として個人 $p$ が適切であるかを判断する。判断基準は以下のとおり。
    - $p$ が既婚者であり、世帯 $f$ の既婚者が $q$ のみで、かつ $p$ と $q$ が異性であり同世代であれば、個人 $p$ は $q$ の配偶者とする。
    - $p$ が未婚者であり、世帯 $f$ に既婚者 $q$ が存在し、かつ $p$ の年齢が $q$ の1世代下であり、かつ世帯内に $q$ の子供が既に1人以上存在するもしくは乱数が $\alpha_2$ 以下であれば、個人 $p$ は $q$ の子供とする。
    - $p$ が既婚者であり、世帯 $f$ に既婚者が存在せず、世帯 $f$ 内の最年長者 $q$ が18歳未満かつ $p$ の1世代下、かつ乱数が $\alpha_3$ 以下であれば、個人 $p$ は $q$ の親とする。

- ・  $p$ が既婚者であり、世帯 $f$ に既婚者が存在し、かつ世帯内の最年長者 $q$ が $p$ の1世代下、かつ乱数が $\alpha_4$ 以下であれば、個人 $p$ は $q$ の親とする。

3-3) 世帯 $f$ の世帯構成員として個人 $p$ が適切であると判断されれば、5)へ。当てはまるものがなければ3-1)へ戻る。 $\alpha_5$ 回数繰り返しても適切な世帯が見つからなければ4)へ。

4) 新しい世帯 $f$ を生成する。5)へ。

5)  $p$ 番目の個人を世帯 $f$ に属させる。1)へ戻る。

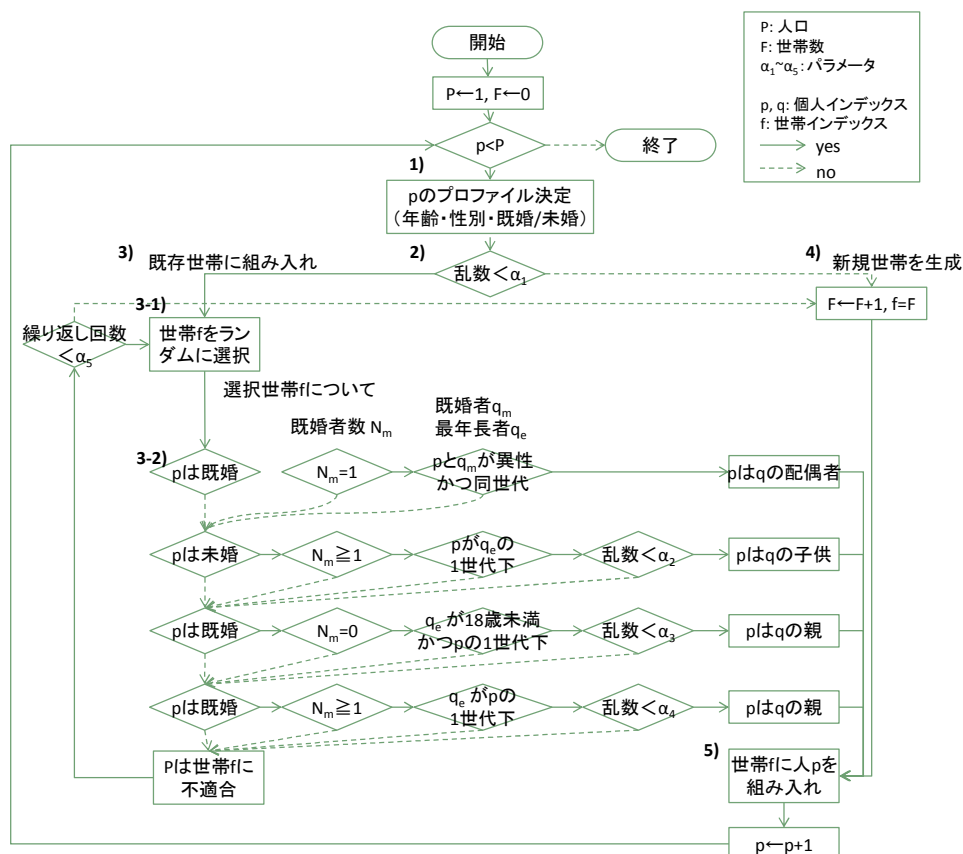


図 2-2 初期の世帯プロフィールの生成方法

### (3) 世帯の将来変化の推計

毎年各人の加齢を行い、その年齢に従って、出生・死亡数を推計した。さらに世帯の変化を見るため、結婚・独立数を推計した。

この推計においては、人口統計資料[56]における2010年の全国平均値から、年齢に対する出産、死亡、既婚確率の近似式を作成して適用した(式1~4)。これらの確率は出産数減少、長寿命化、晩婚化のトレンドにあるが、本推計においては変化しないものとしている。また、子の結婚時には25%が親と同居するものとした[57]。18~33歳の未婚の子は毎年3.3%の確率で親元から独立するものとし、また夫婦は毎年0.5%が離婚するものとした(これらは先行研究における推計結果[55]に整合するよう設定した)。

結婚時には半数は地域外へ転出し、半数は配偶者が地域外から転入するものとした。この場合は人口への影響は相殺されるが、この比率をパラメータとして調整することで人口増減を模擬的に表現する。その他の要因での地域外との人口の転出入は相殺されるものとしてモデル内では扱わず、シナリオとして外生的に与えることとする。

年齢 $a$ における既婚女性の年間出産確率

$$b(a) = k(f(a + 1; \mu, \sigma) - f(a; \mu, \sigma)) / (1 - u_{female}(a)) \quad 2-1$$

$k$

$f(a; \mu, \sigma)$ : 正規累積分布

$\mu$

$u_{female}(a)$ : 女性未婚率関数(2-4 式参照)

パラメータの値[56]

$k$ : 合計特殊出生率 1.4

$\mu$ : 出産年齢平均 29.96,  $\sigma$ : 出産年齢標準偏差 5.502

年齢 $a$ における年間死亡率

$$d(a) = d_1 \exp(d_2 a) \quad 2-2$$

パラメータの値[56]

$d_1$ :  $5.112 \times 10^{-6}$ (男性),  $3.137 \times 10^{-6}$ (女性)

$d_2$ : 0.114(男女共通)

年齢 $a$ における未婚者の新規結婚率

$$m(a) = (u(a - 1) - u(a)) / u(a - 1) \quad 2-3$$

$u(a)$ : 未婚率関数

$$u(a) = \max(1, \frac{u_1}{1 + \exp(u_2(a - u_3))} - u_4 a + u_5) \quad 2-4$$

パラメータの値[56]

$u_1$ : 0.7320(男性), 1.428(女性)

$u_2$ : 0.2345(男性), 0.1726(女性)

$u_3$ : 27.18(男性), 22.91(女性)

$u_4$ : 0.006973(男性), 0.002450(女性)

$u_5$ : 0.5501(男性), 0.2142(女性)

#### (4) 人口・世帯動態モデルの検証

本推計による人口と、人口問題研究所における中位推計[55]の比較を図 2-3 に示す。概ねの傾向は似ているが、2030 年ごろから本推計では 65 歳以上が下振れし、0～14 歳人口が上振れする。これは、本推計では死亡率や出生率が今後も変化しないと仮定しているためである。例えば人口問題研究所においては、合計特殊出生率が 2010 年の 1.387 から、中位推計では 2030 年の 1.351 に低下するとしている。

世帯構成は市区町村によって特徴が異なるため、それに合わせたパラメータ調整が必要となる。国勢調査[58]における市区町村別世帯構成比を用いて、市区町村をクラスタ分析(ウォード法による)により 4 分類に区分すると、概ね都心、郊外、地方、山間に対応するクラスタに分類された。このうち、郊外型の世帯構成を参照して上記手順中のパラメータ $\alpha_1 \sim \alpha_5$ を調整した場合の結果を、図 2-4 に示す。

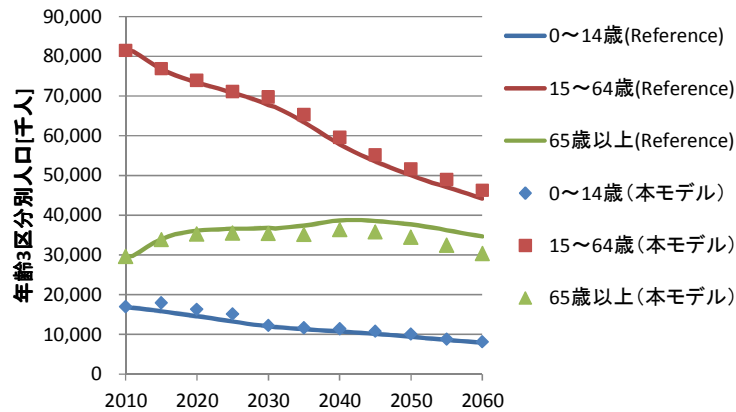


図 2-3 人口・世帯動態モデルの検証(人口)

比較対象 (Reference) は文献[55]。

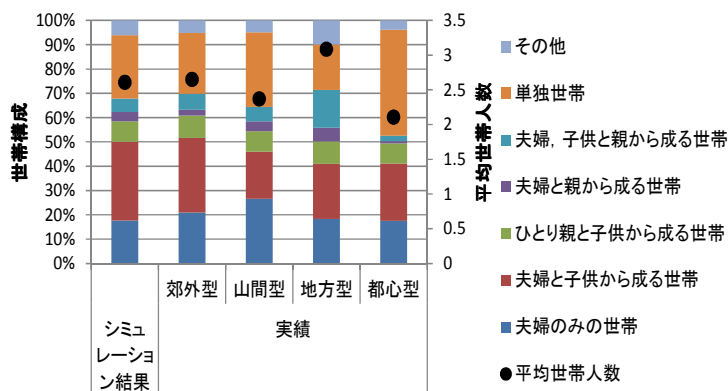


図 2-4 人口・世帯動態モデルの検証(世帯構成)

比較対象 (実績) は文献[58]。

## 2.1.4. 個人の在宅・外出の推計

### (1) 概要

個人の在宅・外出といった行動を表現可能にするため、地区間の人の流れを表現する「個人行動モデル」を構築した。構築したモデルでは、職業別・目的別・出発ゾーン別・到着ゾーン移動目的地別・時間別の移動（トリップ）を推計し、職業別・ゾーン別・建物用途別・時間別の滞在数を推計する。モデル化においては、全国都市交通特性調査に基づき分析されている交通特性[59]を参考にした。

平成 20 年度東京都市圏交通計画協議会におけるパーソントリップ調査と、本モデルでの職業と移動目的の対応を表 2-1、表 2-2 に示す。東京都市圏は市区町村を基本とする「計画基本ゾーン」レベルで 601 に分割されており、移動の起点・終点はこのゾーン単位で表現されている。

表 2-1 パーソントリップ調査における職業と本モデルでの職業の対応

本モデル	パーソントリップ調査
農業等従事者 1	農林水産業従事者（若中年）
農業等従事者 2	農林水産業従事者（高年）
販売従事者	販売従事者
工業従事者	技能工・生産工程従事者
他サービス業従事者	サービス業従事者、輸送・通信従事者、保安職業従事者、事務的職業従事者、専門的・技術的職業従事者、管理的職業従事者
主婦等 1	主婦・主夫（若中年）、無職（若中年）
主婦等 2	主婦・主夫（高年）、無職（高年）
小中学生	園児・小学生・中学生
他学生	高校生、大学生・短大生・各種専門学校生

表 2-2 パーソントリップ調査における移動目的と本モデルでの移動目的の対応

本モデル	パーソントリップ調査
通勤	勤務先へ
業務	販売・配達・仕入・購入先へ、打合せ・会議・集金・往診へ、作業・修理へ、農林漁業作業へ、その他業務へ
通学	通学先へ
帰宅	自宅へ
買物	買物へ
娯楽等	食事・社交・娯楽へ
レジャー	観光・行楽・レジャーへ
通院	通院
その他	送迎、その他

### (2) モデルの定式化

モデルの定式を以下に述べる。式中の添え字・パラメータの意味は表 2-3 に示すとおりである。

表 2-3 個人行動モデルにおける記号の説明

添え字	
$z$	ゾーン
$d$	建物用途（店舗、オフィス、住宅等）
$o$	移動目的（通勤、業務、通学等）
$j$	職業
$h$	時刻
パラメータ	
$T_{z',z}$	ゾーン $z'$ からゾーン $z$ への平均移動時間
$A_{d,z}$	ゾーン $z$ の、建物用途 $d$ への適合性を表すパラメータ
$B_{d,z}$	
$V_{d,z,z'}$	ゾーン $z'$ から建物用途 $d$ への移動における、ゾーン $z$ の効用
$P_{d,z,z'}$	ゾーン $z'$ から建物用途 $d$ への移動における、ゾーン $z$ の選択確率
$Pest_{d,z,z'}$	ゾーン $z'$ から建物用途 $d$ への移動における、ゾーン $z$ の選択確率推計値
$R_{j,d,o,h}$	職業 $j$ 、滞在建物用途 $d$ の人の、時刻 $h$ での移動目的 $o$ による移動割合
$b_{j,o,d}$	職業 $j$ の人の、移動目的 $o$ による移動先が $d$ であるときに1をとるバイナリ変数
$N_{z,j,d,h}$	職業 $j$ の人の、時刻 $h$ での、ゾーン $z$ 、滞在建物用途 $d$ における滞在人数

### 1) トリップの発生

トリップの発生確率は、職業・時刻・滞在中の建物用途・移動目的により決まるものと想定する。また、職業・移動目的別に、移動先の建物用途（例：工業従事者が通勤目的で移動する際は、移動先の建物用途は工場）を表 2-4 のとおり定める。

表 2-4 移動目的・職業と建物用途の対応

移動目的	職業	建物用途
通勤、 業務	農業等従事者 1、農業等従事者 2	農業等
	販売従事者	店舗
	工業従事者	工場
	他サービス業従事者	オフィス
	上記以外	店舗
通学	全て	学校
帰宅	全て	住宅
買物	全て	店舗
娯楽等	全て	娯楽施設
レジャー	全て	レジャー施設
通院	全て	病院
その他	全て	その他



## 2) 目的地の選択

帰宅を除くトリップの目的地は、目的地の建物用途への適合性（例：都心部はオフィスへの移動に対する適合性が高い）と、出発地・目的地間の所要時間の、二つの要因で決まるものとした。なお、帰宅のトリップの目的地は、常に居住地ゾーンである。

所要時間の対数の一次式を、当該トリップの効用関数として定義する（2-5）。一次式の係数 A(正值), B は、目的地の建物用途としての適合性を表す。

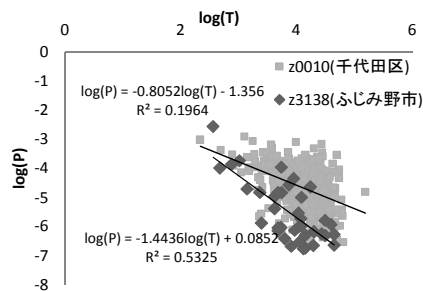
$$V_{d,z,z'} = -A_{d,z} \times \log(T_{z',z}) + B_{d,z} \quad 2-5$$

目的地の選択確率は、この効用関数の指数に比例すると想定する（2-6）。

$$P_{est,d,z,z'} = \frac{\exp(V_{d,z,z'})}{\sum_{z'} \exp(V_{d,z,z'})} \quad 2-6$$

式 2-5、2-6 は、目的地までの所要時間の対数と選択確率の対数には線型関係（2-7）があることを想定していることに相当する。図 2-5 に示した人の流れデータセットにおける実際の例からは、所要時間の対数と選択確率の対数の線型関係が確認され、図中の直線の傾きがパラメータ A(逆符号)に相当する。

$$\log(P_{est,d,z,z'}) = -A_{d,z} \times \log(T_{z',z}) + B_{d,z} - \log\left(\sum_{z'} \exp(V_{d,z,z'})\right) \quad 2-7$$



		値	t 値	自由度	p 値
z0010	傾き	-0.8052	9.483	368	<10 <sup>-6</sup>
z3138	傾き	-1.4436	6.403	36	<10 <sup>-6</sup>

図 2-5 所要時間と目的地選択確率の関係の例

オフィスへの移動時における、各ゾーンからゾーン z0010 (千代田区), z3138 (ふじみ野市) への所要時間 T と、各ゾーンからゾーン z0010, z3138 の選択確率 P の関係。

## 3) 時間毎の滞在人数の算出

時間別・建物用途別の滞在人数は、前時間における滞在人数に、流入する人口を加え、流出する人口を減じることによって算出される。流出入人口は、以上で述べた目的地への出発時間や目的地の選択確率によって表現される（2-8）。

$$N_{z,j,d,h} = N_{z,j,d,h-1} + \sum_{z',d',o} N_{z',j,d',h-1} \times R_{j,d',o,h} \times Pest_{d,z',z} \times b_{j,o,d} \\ - \sum_{z',d',o} N_{z,j,d,h-1} \times R_{j,d,o,h} \times Pest_{d,z,z'} \times b_{j,o,d}$$

2-8

### (3) パラメータの決定

モデルに用いるパラメータは、前述の人の流れデータセットを用いて決定した。本データには、約 60 万人分の属性情報と、2008 年 10 月 1 日～2 日の 1 分間隔の緯度・経度、移動中であればその移動目的・手段等情報が含まれている。これを集計することにより、ゾーン間平均移動時間 **T**、ゾーン選択確率 **P**、移動割合 **R** を得た。また、目的地の適合性を示すパラメータ **A**, **B** は、実際のゾーン選択確率 **P** と推計値 **Pest** の差分の二乗を、出発ゾーン人口で加重した後の総和が最小となるよう決定した。なお、パーソントリップ調査において移動実績が観測されなかったゾーン間は、そのリンクが存在しないものとした。

なお、パーソントリップ調査の調査時期の制約により、移動発生の子節・曜日変動は考慮していない。

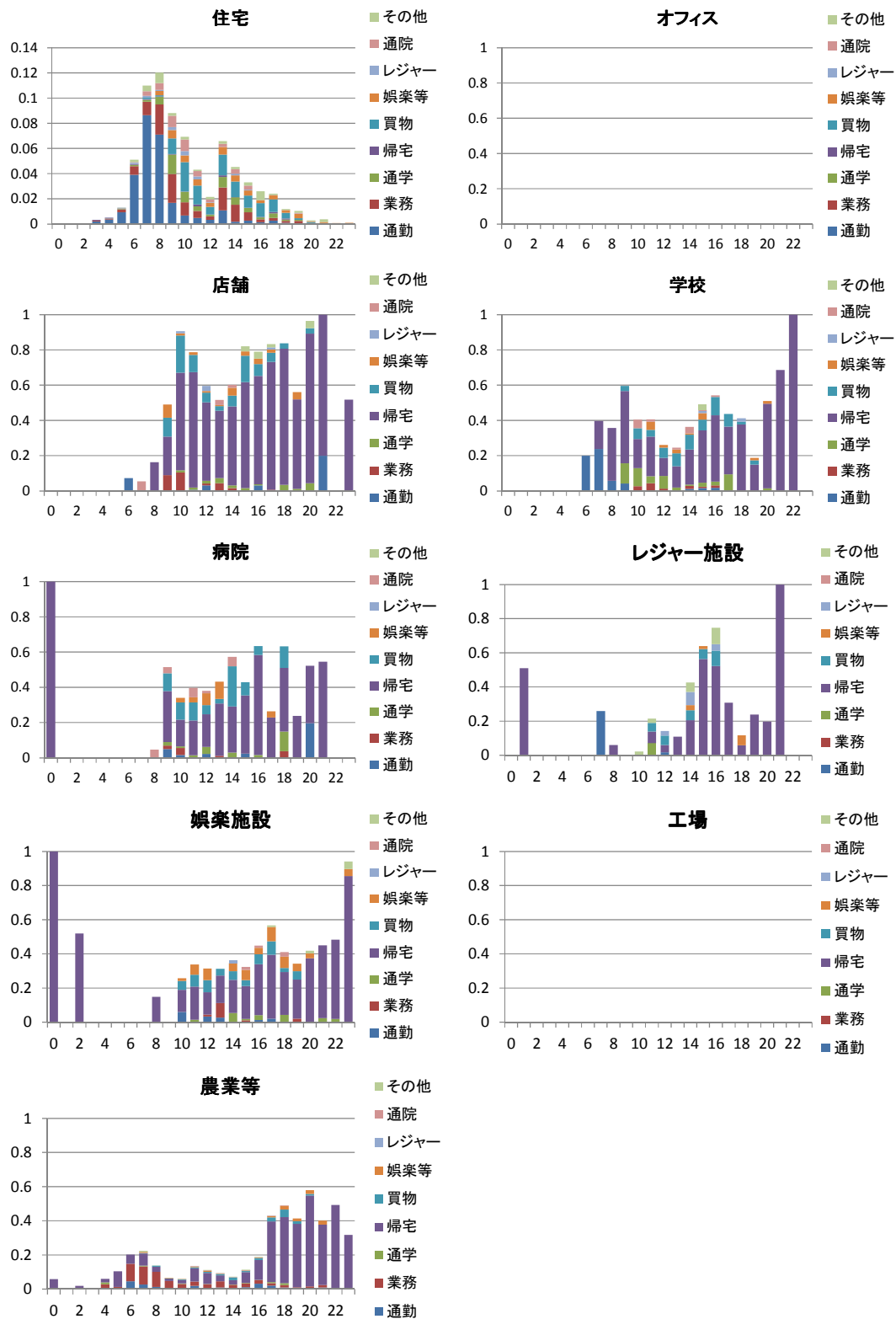


図 2-6 「農業従事者 1」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

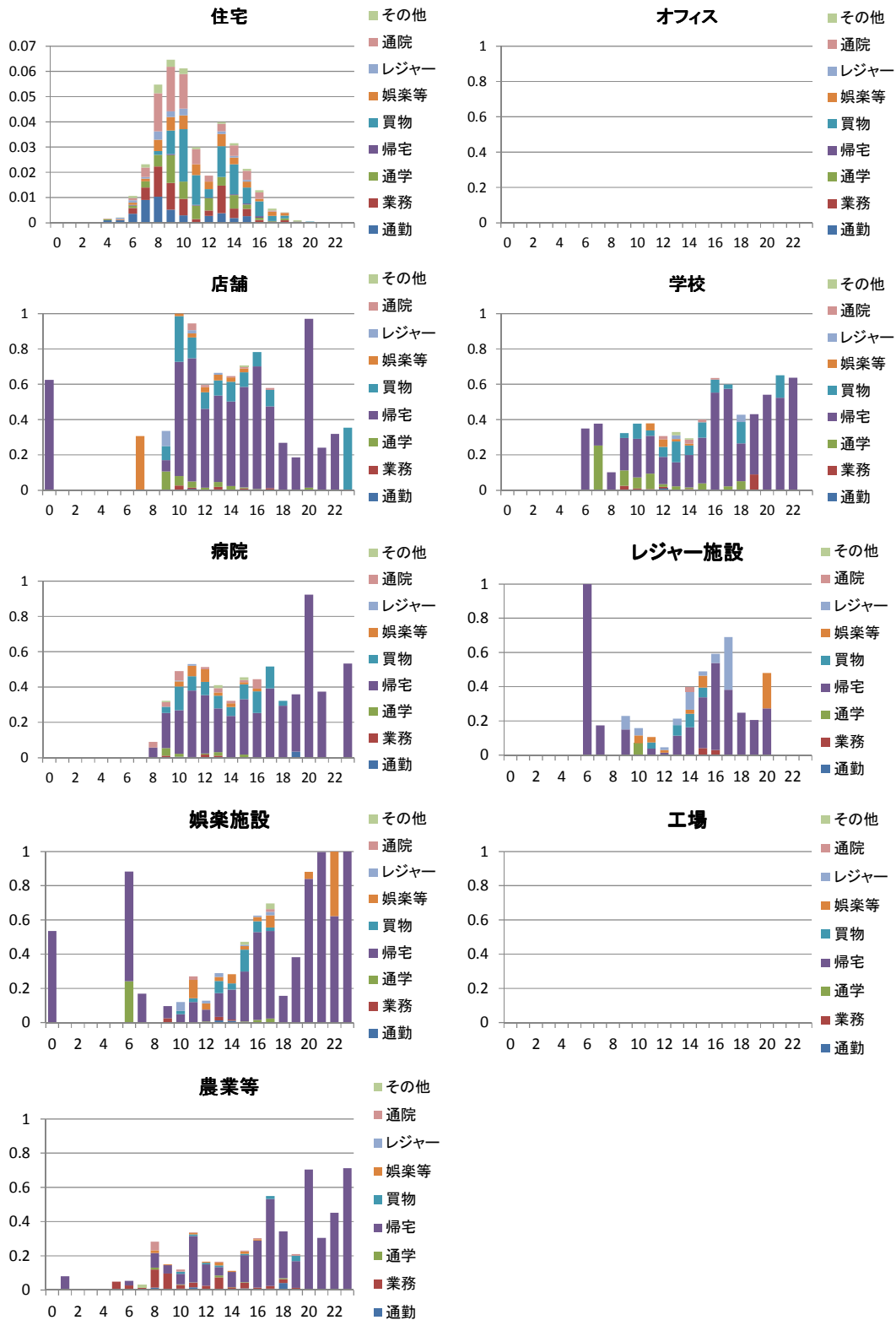


図 2-7 「農業従事者 2」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

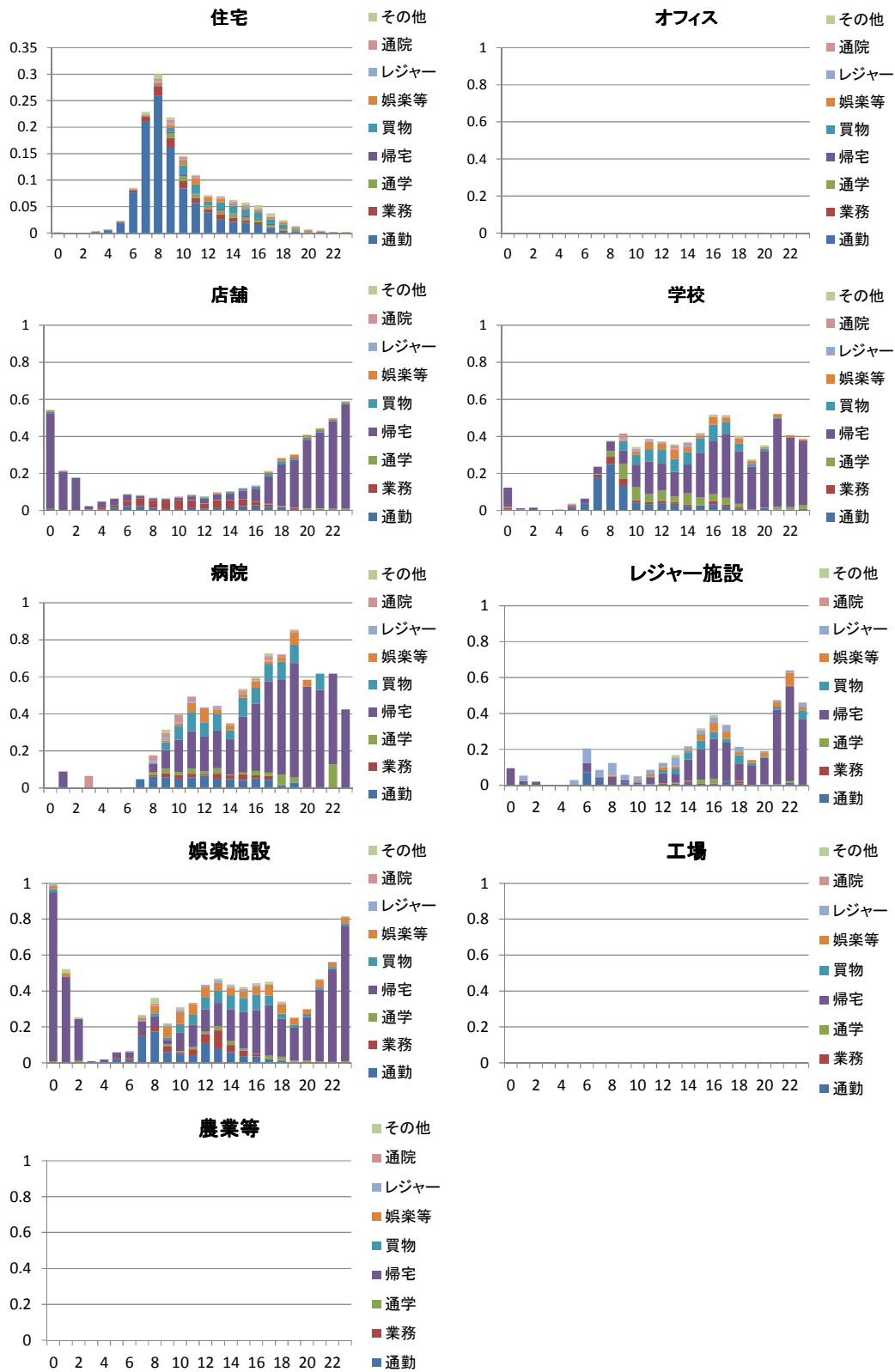


図 2-8 「販売従事者」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

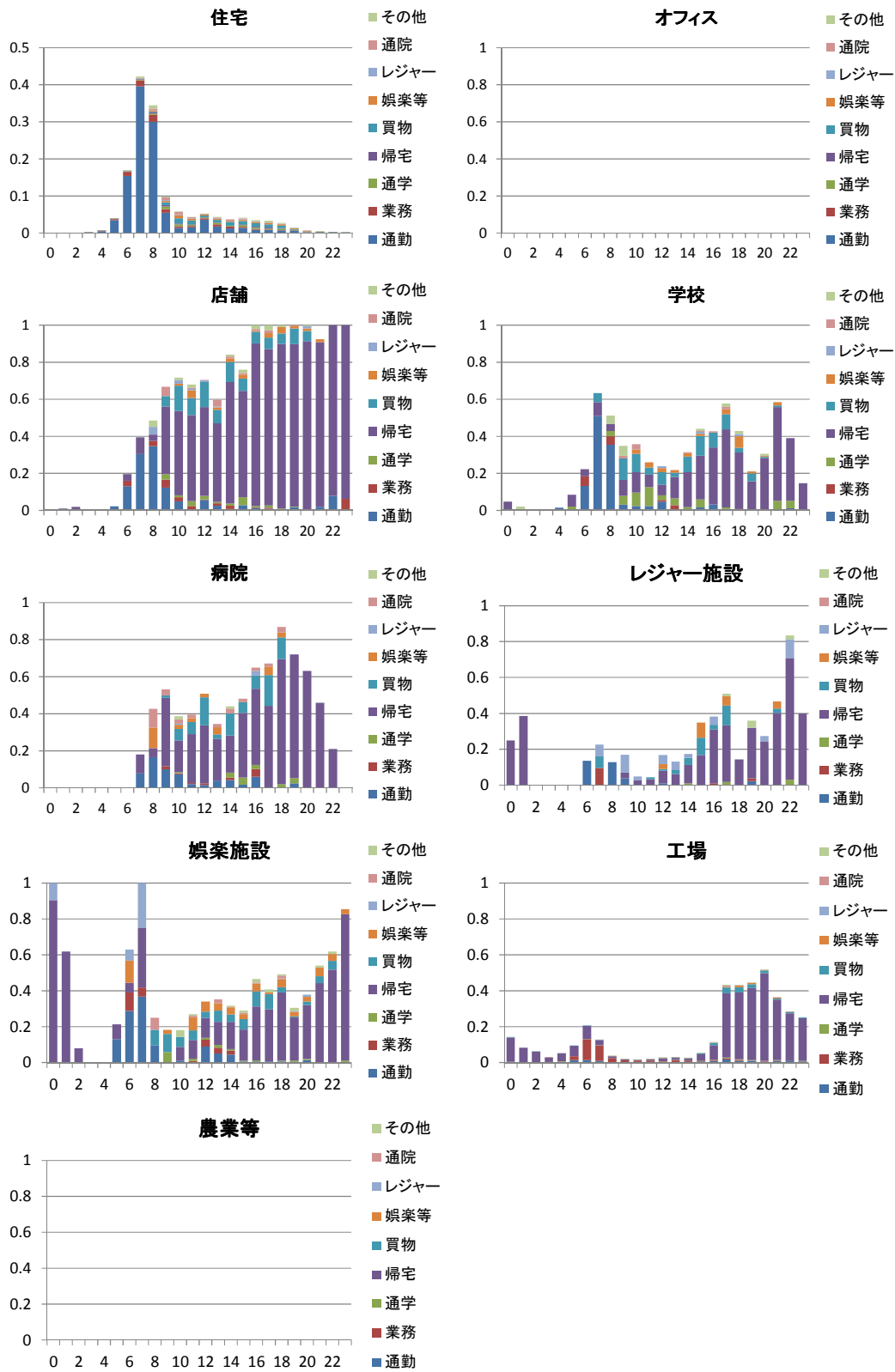


図 2-9 「工業従事者」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

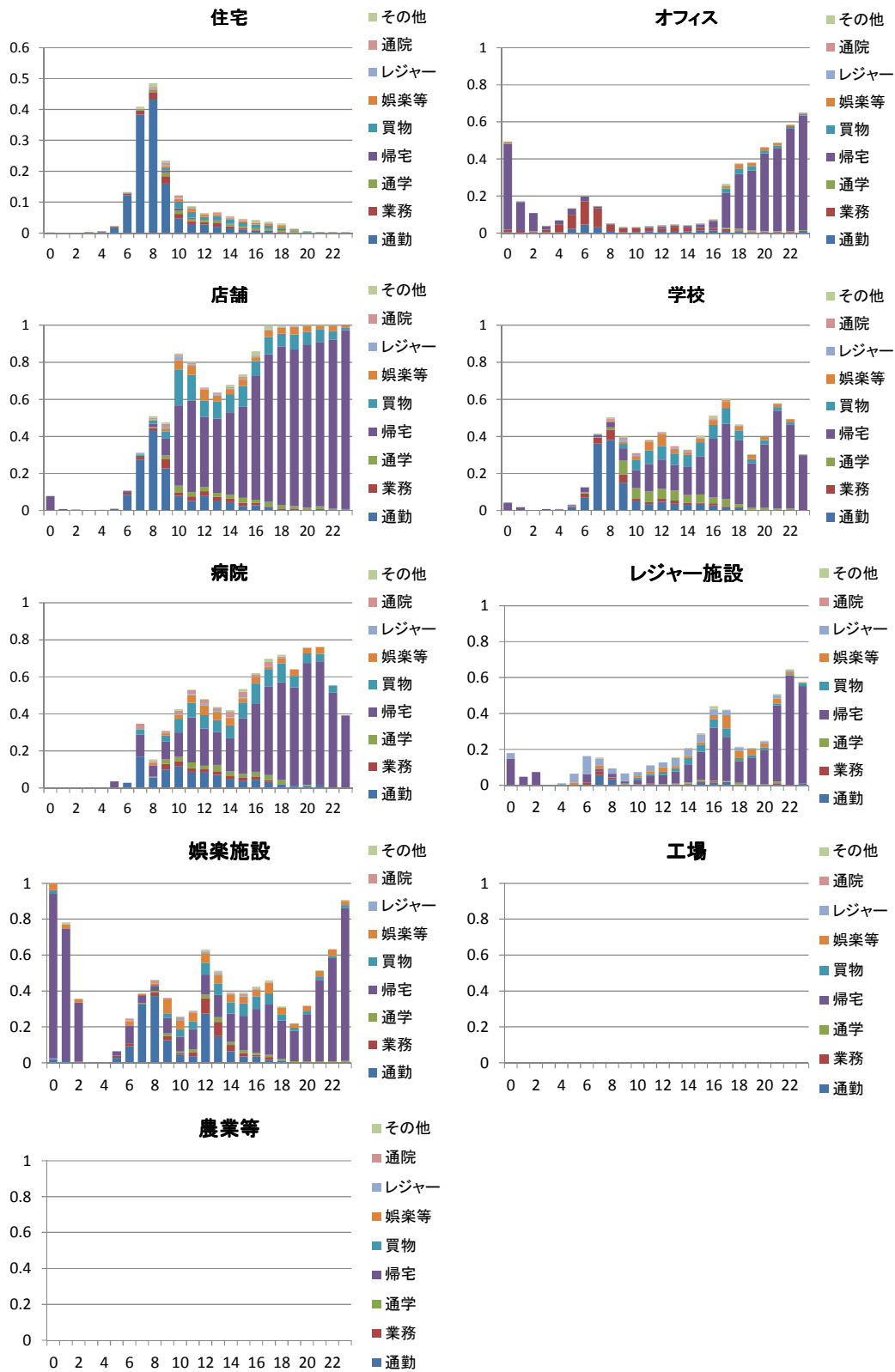


図 2-10 「他サービス業従事者」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

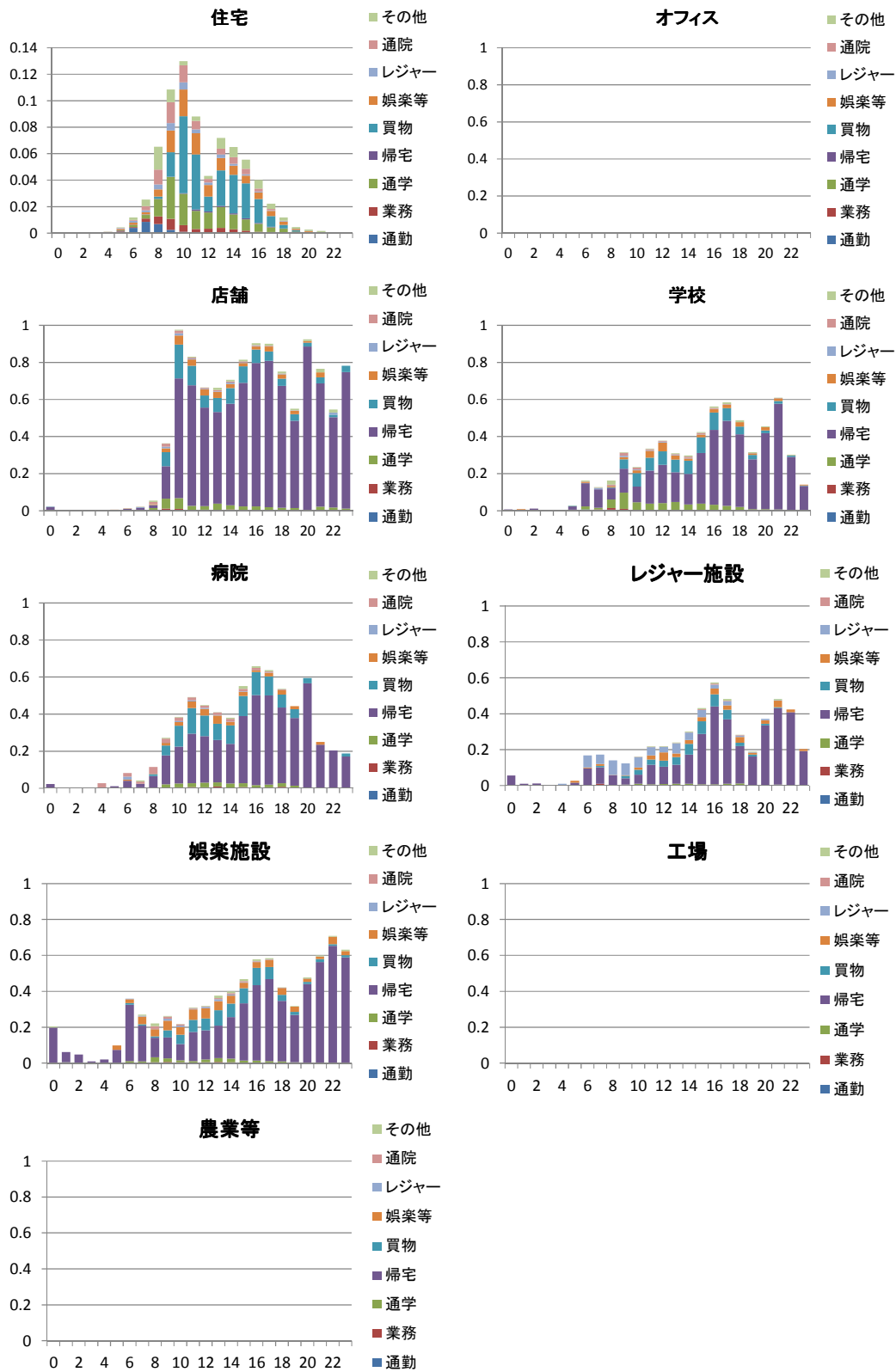


図 2-11 「主婦等 1」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率



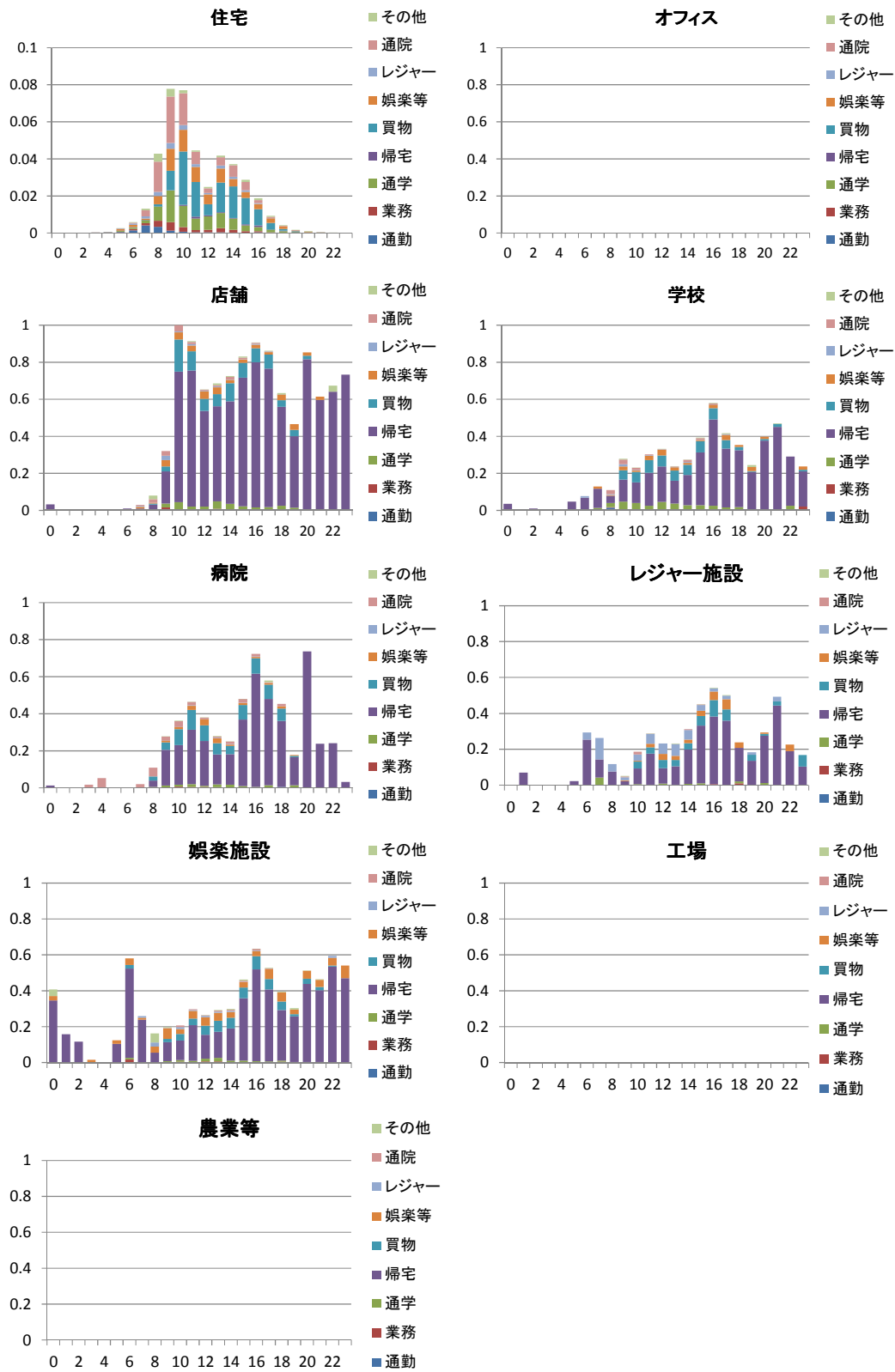


図 2-12 「主婦等 2」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

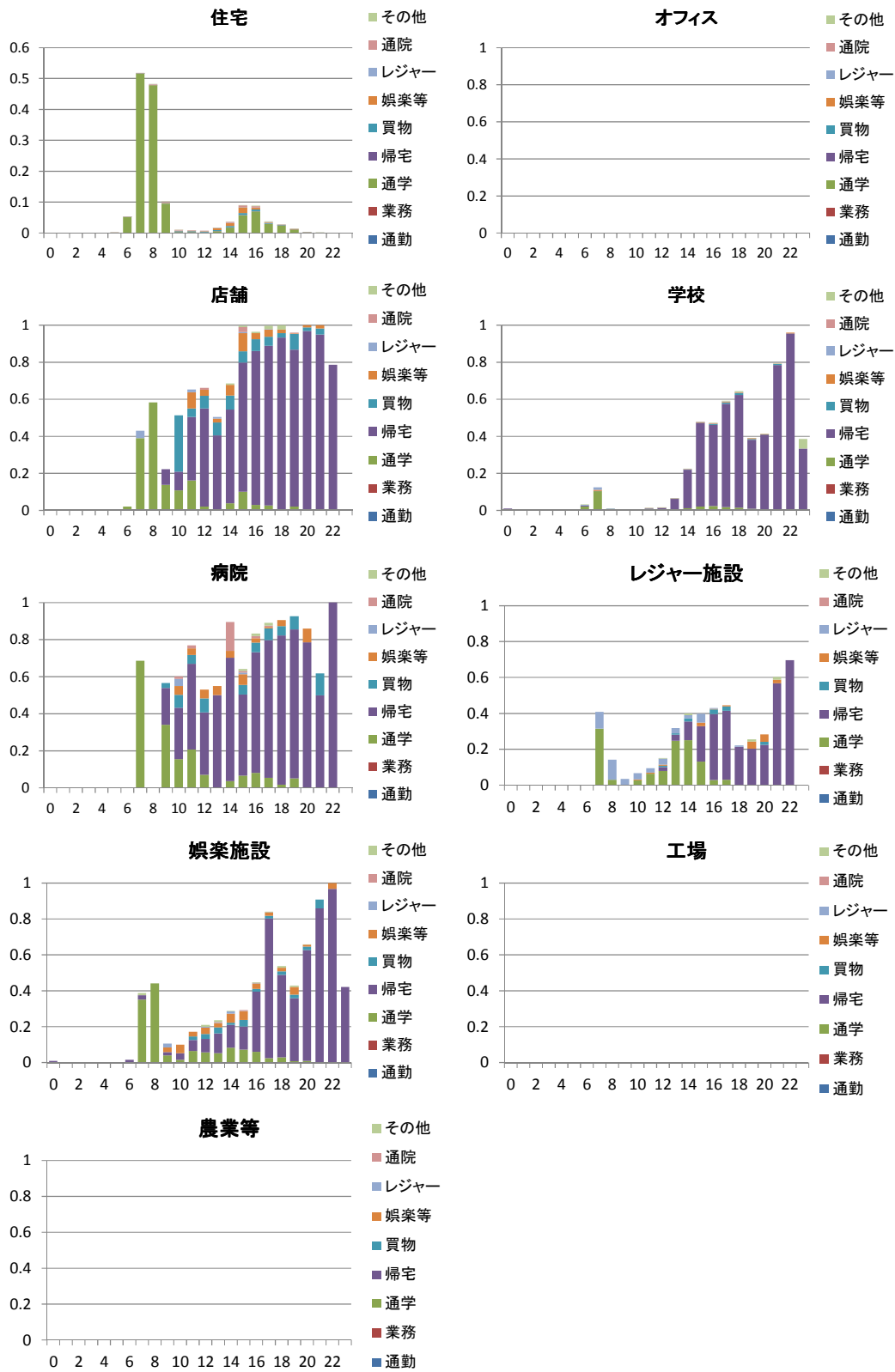


図 2-13 「小中学生」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

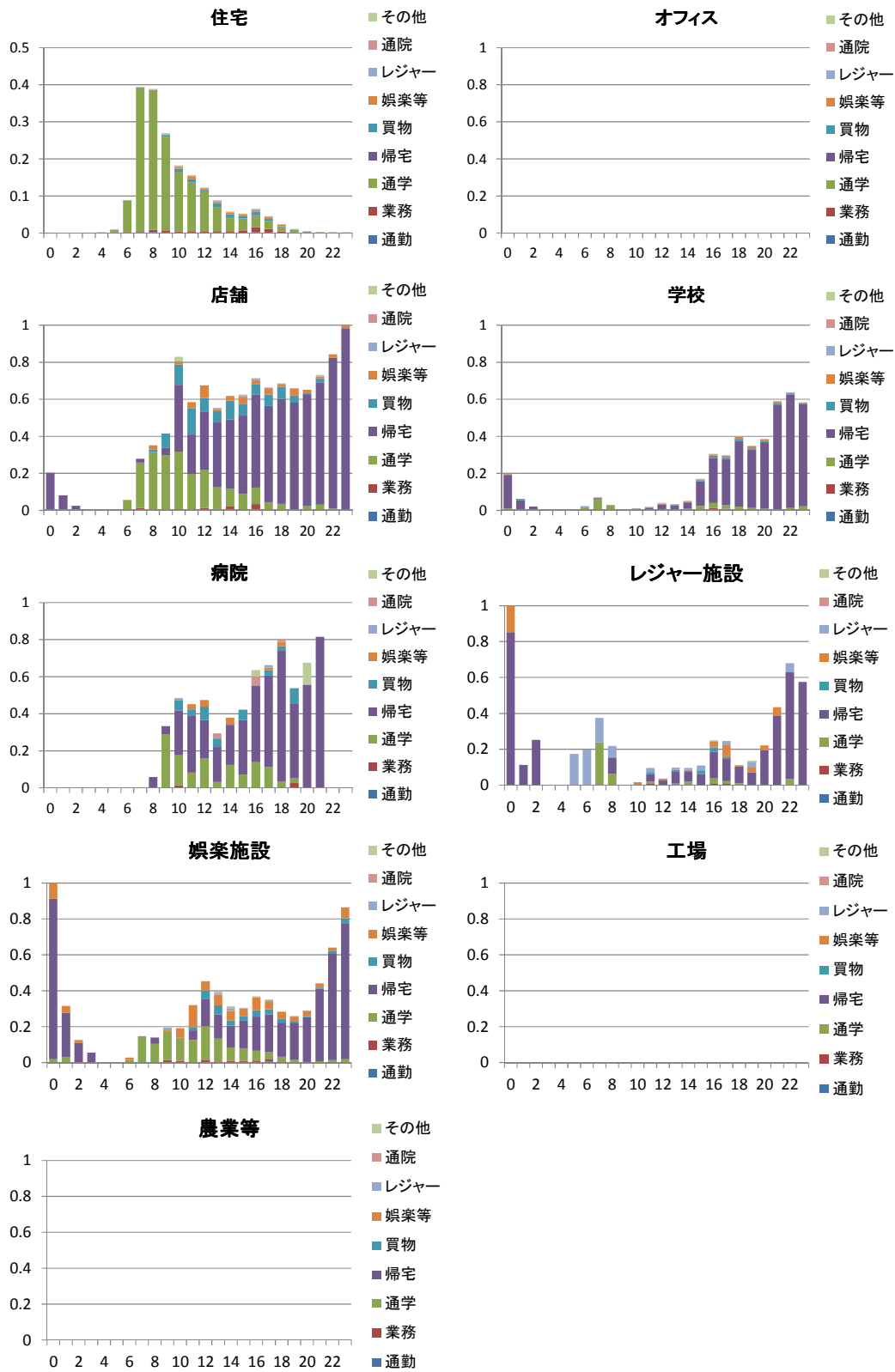


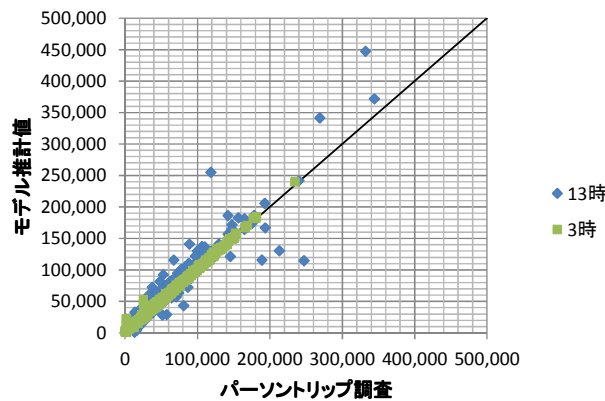
図 2-14 「その他学生」の時刻・滞在中の建物用途・移動目的移動確率

#### (4) 個人行動モデルの検証

##### 1) 実績値との乖離

上述の方法で決定したパラメータを用いて推計したゾーン別の 13 時、3 時人口を、パーソントリップ調査結果と比較したものを図 2-15 に示す。

昼夜の差が大きいいくつかのゾーンで推計値の乖離が大きくなっているが、これはパラメータ決定において出発ゾーン人口で加重した影響が表れているものと考えられる。



		値	t 値	自由度	p 値
13 時	傾き	0.870	75	599	<10 <sup>-6</sup>
	切片	1177	1.4	599	0.16
3 時	傾き	0.988	314	599	<10 <sup>-6</sup>
	切片	-245	1.1	599	0.26

図 2-15 個人行動モデルの検証

##### 2) 用途への適合性パラメータについての考察

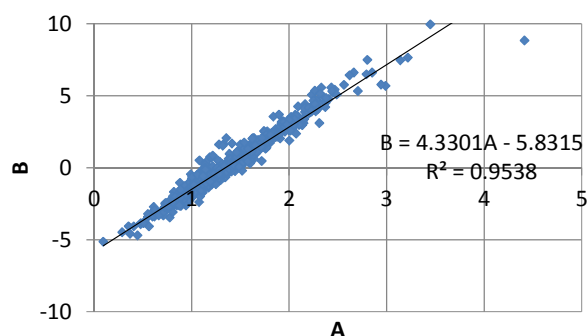
目的地の適合性を示すパラメータ A と B の間には、図 2-16 に示すような線形の関係が見られた。(式 5)でゾーンの適合性を表す 2 パラメータを用いて定義した効用関数が、実際は 1 パラメータで十分であったことを表している。B を消去すると式 2-5 は、A と新たな正のパラメータ  $\alpha_d$ ,  $\beta_d$  (ゾーンによらず固定) を用いて、式 2-9 のように変形できる。A (正值) が小さいほど、遠近に関わらず移動の目的地になりやすい。一方で、近隣距離の移動であれば ( $\log(T_{z',z}) - \alpha_d < 0$ )、同じ時間で到達できるゾーン間では A が大きい地域のほうが選ばれやすい。

$$V_{d,z,z'} = -A_{d,z} \times \log(T_{z',z}) + (\alpha_d A_{d,z} - \beta_d) = -A_{d,z} \times (\log(T_{z',z}) - \alpha_d) - \beta_d \quad 2-9$$

ただし、目的地の適合性は、周囲のゾーンとの相対的な関係において定まることに留意が必要である。例えば、一般に丸の内は八王子よりもオフィスとして適していると思われるが、丸の内は周辺地区との競争が大きい一方で八王子が周辺では随一のビジネス街であれば、八王子のほうが高い適合性となり得る。

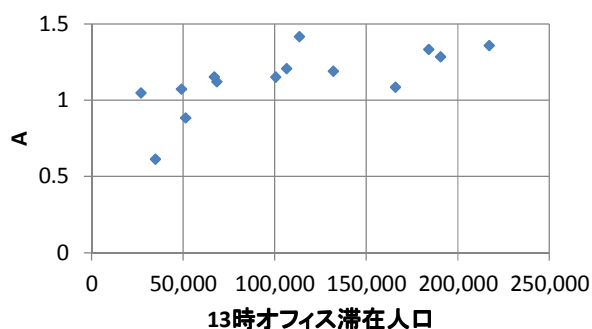
逆に、近接した地域内であれば、適合性係数 A が大きいほど、各用途の当該地区の競争

力が大きいことをある程度反映する。図 2-17 に、千代田区・中央区・港区内の 14 ゾーンにおける、13 時オフィス滞在人口とパラメータ A の関係を示す。オフィス滞在人口が多いゾーンほど、パラメータ A が大きい関係が確認される。



	値	t 値	自由度	p 値
傾き	4.330	110	585	<10 <sup>-6</sup>
切片	-5.831	95	585	<10 <sup>-6</sup>

図 2-16 目的地適合性パラメータの関係(オフィスの例)



	値	t 値	自由度	p 値
傾き	2.271 × 10 <sup>-6</sup>	3.29	12	0.001
切片	0.8907	10.46	12	<10 <sup>-6</sup>

図 2-17 オフィスとしての適合性と滞在人口の関係

## 2.1.5. エネルギーサービス需要の推計

### (1) 在宅時のエネルギーサービス需要

個人が在宅しているときのエネルギーサービス需要の推計には、大きな比率を占める冷暖房・給湯が切り分けられ、かつ可能な限りシンプルな方法を採用した。以下に示すとおり、各個人に在宅時間のうち起床・入浴・就寝の時刻を決定し、その行動をエネルギーサービス需要に結びつけている。世帯内複数人でのエネルギー同時使用の際には需要が逡減するものとしている。

- 1) 外出・帰宅時刻の決定：前述の個人行動のモデルから、外出・帰宅時刻を決定する。
- 2) 就寝・起床時刻の決定：外出・帰宅時刻と、NHK 国民生活時間調査報告書[60]における性別・年代別就寝時刻、睡眠時間から、就寝・起床時刻を決定する。
- 3) 入浴時刻の決定：起床在宅時間と、NHK 国民生活時間調査報告書における「身のまわりの用事」時間分布から、入浴時刻を決定する。
- 4) 各生活時間と、時間あたり原単位をもとに、家庭のエネルギーサービス需要を暖房・冷房・給湯・ベース動力・その他動力等の5区分で推計する。

上記手順の4におけるエネルギーサービス需要は、表2-5の想定のもと推計した。各用途のエネルギーサービス需要 $D$ は、原単位 $U$ とエネルギー同時使用人数（給湯の場合は世帯人数） $N$ 、逓減指数 $\alpha$ を用いて、式2-10にて推計している。これらを含む各パラメータは、ボトムアップ型推計の先行研究[49]や家庭内エネルギー消費の実測値[61]、アンケートによる把握を行った文献値[62][63]等を参考に設定した。

$$D = U \times N^\alpha \quad 2-10$$

表 2-5 生活時間別・用途別のエネルギーサービス需要推計方法

	起床在宅時	入浴時	就寝時	外出時	逓減指数
暖房	$RHU \times \min(0, T_{h1} - T_t)$	同左	$RHU \times \min(0, T_{h2} - T_t)$	0	0.5
冷房	$RCU \times \min(0, T_t - T_{c1})$	同左	$RCU \times \min(0, T_t - T_{c2})$	0	0.5
給湯	0	$WHU \times (T_w - T_t)$	0	0	0.5
ベース動力	BPU	BPU	BPU	BPU	0.5
その他動力等	OPU	0	OPU	0	0.5

逓減指数 $\alpha$ は、エネルギー使用人数が $N$ のときに需要が $N^\alpha$ になることに対応する。

RHU: 暖房原単位 0.29[MJ/h.K], RCU: 冷房原単位 0.36 [MJ/h.K], WHU: 給湯原単位 0.72[MJ/h.K], BPU: ベース動力原単位 0.72[MJ/h], OPU: その他原単位 1.4[MJ/h]

$T_t$ : 外気温,  $T_{h1}$ : 暖房気温閾値(起床在宅時) 18[°C],  $T_{h2}$ : 暖房気温閾値(就寝時) -10[°C],  $T_{c1}$ : 冷房気温閾値(起床在宅時) 24[°C],  $T_{c2}$ : 冷房気温閾値(就寝時) 40[°C],  $T_w$ : 給湯温度 60[°C]

## (2) 家庭以外滞在時のエネルギー需要

家庭以外滞在時のエネルギー消費は、各ゾーンの建物用途別延床面積と建物用途別滞在人口から推計する。建物用途は、業務の典型的な需要パターンであり、かつ原単位データが得られる事務所と店舗に大別する。

建物用途別の、延床面積あたりエネルギーサービス需要（電力、給湯、暖房、冷房）を、文献[64]から12か月・24時間帯別に得て、これを標準的な需要パターンとした。また、滞在率を、時間帯別延床面積あたり人口の、日中の延床面積あたり人口の全ゾーン平均値（平均滞在率）を1とした比率で表現した。標準的な需要パターンと滞在率から、エネルギー

サービス需要を推計した(表 2-6)。この推計方法では、ゾーンにおける滞在率平均を用いており、個別建物毎の滞在率の違いは考慮していない。

業務系建物における滞在状況とエネルギー消費の関係については先行研究[65]等で指摘されているところであるが、用途別や時間変化の詳細は今後の BEMS (Building Energy Management System)等でのデータの蓄積・分析を待つ必要がある。

表 2-6 滞在率別のエネルギーサービス需要の想定

需要	想定
電力	ベース需要を除いた部分は滞在率に比例
給湯・暖房・冷房	<ul style="list-style-type: none"> <li>・滞在率が 50%以上では、平均滞在率も 50%以上であれば標準的な需要パターン[64]における消費量と同値。そうでなければ平均滞在率が 50%を切る直前の時間帯の消費量と同値</li> <li>・滞在率が 50%以下では、ゼロ</li> </ul>

建物用途別の延床面積は、財団法人日本建設情報総合センターが整備した平成 17 年度 100m メッシュ延床面積データ[66]を利用して推計した。しかし、このデータには建物の用途に関する情報が含まれない。そこで、都道府県地価調査データ[67]における基準地約 4000 地点について、その利用現況に従って建物用途比率（住宅、店舗、事務所、工場、倉庫）を設定し、各メッシュには想定した最寄りの基準地の利用現況キーワードに基づく建物用途比率（表 2-7）を適用することにより、100m メッシュ用途別延床面積を推計した。

表 2-7 土地利用現況別の建物用途比率の想定

利用現況 (キーワード)	住宅	店舗	事務所	工場	倉庫
住宅	0.8	0.1	0.1	0	0
店舗	0.1	0.7	0.2	0	0
共同住宅	0.6	0.2	0.2	0	0
事務所、銀行	0	0	1	0	0
工場	0	0	0	1	0
倉庫	0	0	0	0	1
農地、雑木、用材、空地、原野	0.8	0.1	0.1	0	0
その他	0	1	0	0	0

複数該当する場合は、合計の上で 100%となるように調整。

### (3) 移動時のエネルギー需要

移動時のエネルギーサービス需要は、個人行動モデルからゾーン間移動人数が得られる。これに、ゾーン重心間の直線距離に道路距離と直線距離の比 1.3[68]を乗じることで人キロに換算した。また、比較のために、移動量に移動目的に応じた移動手段別原単位を乗じる

ことによってエネルギー量に換算している。移動手段別平均原単位は、69)における移動手段別二酸化炭素排出量から、燃料種を仮定してエネルギー量に換算した値を用いた(表 2-8)。

表 2-8 移動手段別のエネルギー需要

移動手段	需要[MJ/人.km]
列車	0.265
バス	0.722
自家用車	2.519
二輪車	0.722

#### (4) エネルギー需要推計の検証

以上の方法を用いて推計したエネルギーサービス需要の推計結果を、統計値や別文献における調査値と比較する。なお、本手法ではエネルギーサービス需要を推計しているが、エネルギー消費量との比較に当たっては、表 2-9 に想定する最終需要機器（エアコン、給湯器等）の効率で除することにより、エネルギー消費量に換算している。

表 2-9 比較において想定する最終需要機器の効率

	効率
暖房	1
冷房	3
給湯	1
ベース動力	1
その他動力等	1

#### 1) 世帯のエネルギー消費量との比較

関東の2011年の外気温データを適用した際の世帯類型別のエネルギー消費量推計結果と、文献値[62]におけるエネルギー消費量との比較を図 2-18 に示す。本推計においては、世帯類型の定義は表 2-10 に示すとおりである。

表 2-10 世帯類型の定義

類型	定義
若中年単身	世帯人数が1人であり、65歳未満
高齢単身	世帯構成員が1人であり、65歳以上
若中年夫婦	世帯構成員が互いに結婚している2人であり、いずれも65歳未満
高齢夫婦	世帯構成員が互いに結婚している2人であり、いずれかが65歳以上
若中年2世代	世帯構成員が2世代（20歳差以上）に分かれ、最年長年齢が65歳未満
高齢2世代	世帯構成員が2世代（20歳差以上）に分かれ、最年長年齢が65歳以上
3世代他	その他



文献[62]では、高齢者が含まれる世帯ほどエネルギー消費量が少ないという結果となっており、高齢者が冷暖房をあまり使用しないことを指摘している。ただし、最近では高齢者のいる家庭ほどエネルギー消費量が多いとの調査結果[63]もあるように、エネルギーの使い方は年齢別のみではなく、コーホート別にも把握する必要があることを示唆している。本稿では、冷暖房需要の年齢や出生年による差は考慮していない。

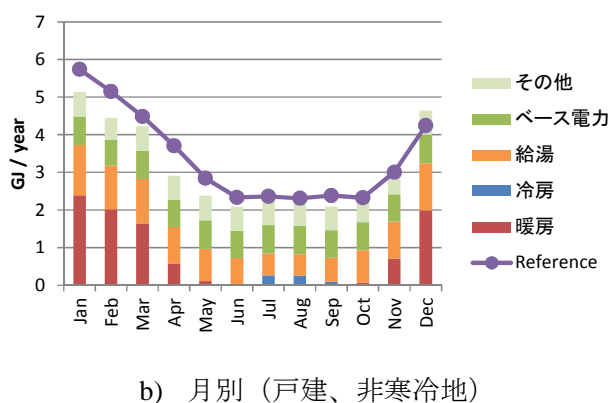
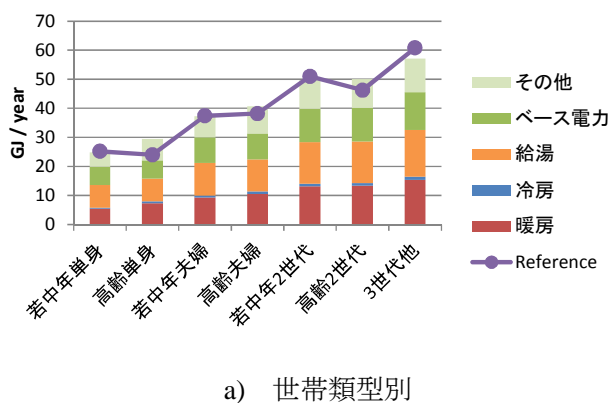


図 2-18 家庭のエネルギー需要推計値の検証

推計した暖房・冷房・給湯・ベース電力・その他サービス需要のうち、冷房のみ機器 COP3 を想定して最終消費量に換算。

a)の比較対象(Reference)は文献[62]、b)は文献[63]。

## 2) 地域のエネルギー消費量との比較

ゾーン単位で家庭・業務・輸送旅客エネルギーサービスを推計し東京都市圏で集計した結果と、都道府県別エネルギー消費統計[70]の値とを比較したものを図 2-19 に示す。同図に注記したように、比較においてはベースが異なる部分があり、また上述したように各部門のエネルギー需要推計において想定をおいている部分があるが、全体としては統計値と同オーダーの値が得られることが確認された。

なお、運輸部門(乗用車)の差については、本推計でベースとしたパーソントリップ調査が平日のみの調査であることが挙げられる。休日調査も行っている全国都市交通特性調

査によると、三大都市圏では平日より休日のほうが乗用車分担率は 15%ポイント強高く、平日と休日での乗用車によるトリップの所要時間には大差はない[71]。休日の乗用車によるエネルギー消費量は、三大都市圏の中心部では 1.8 倍、周辺都市（中心 40km 未満）では 1.5 倍、周辺都市（中心より 40km 以上）では 1.3 倍と推計され、平日と加重平均すると乗用車によるエネルギー消費量を 15%程度押し上げることになる。

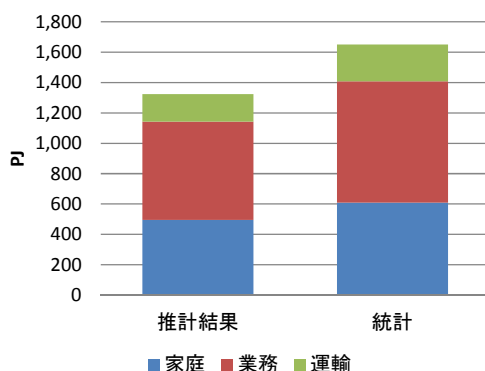


図 2-19 東京都市圏のエネルギー需要推計値の検証

推計結果：東京都市圏パーソントリップ調査の対象地域（茨城県は南部のみ）のエネルギーサービス需要。輸送は、従来のモード別分担比を想定して乗用車・二輪車需要をエネルギー量に換算したもの。

統計：都道府県別エネルギー消費統計[70]より、茨城県の 1/2 と、神奈川県、東京都、千葉県、埼玉県の合計の最終エネルギー消費。業務としては商業・金融・不動産、公共サービス、対事業所サービス、対個人サービスの消費を計上。輸送（旅客）は乗用車分のみが含まれる。



図 2-20 代表交通手段分担率

出所) [71]

### 2.1.6. 本節のまとめ

本節では、地区内の人口構成の変化がもたらすエネルギーサービス需要変化を推計するためのモデルを構築した。モデルでは地区の人口変化・世帯構成をシミュレーションした上で、在宅・外出行動を推計し、それに対応するエネルギーサービス需要（暖房、冷房、給湯、動力、移動）を推計するという手法をとった。

## 参考文献

- [48] 小宮山涼一, 鈴木研悟, 永富悠, 松尾雄司, 末広茂, 「統合型エネルギー経済モデルによる2050年までのエネルギー需給の分析」, エネルギー・資源, 33(2), 112, 2012.
- [49] 森川貴夫, 下田吉之, 水野稔, 「住宅や機器の性能分布を考慮した大阪市住宅エネルギー需要の推計 世帯詳細区分型都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発と応用(2)」, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 595, pp. 97-104, 2005.
- [50] 坂本将吾, 「世帯の活動を考慮した都市圏エネルギー需要モデルの構築」, 日本交通政策研究会, 日交研シリーズ A-471, 2009.
- [51] 中井秀信, 森本章倫, 「コンパクトシティ政策が民生・交通部門のエネルギー消費量に与える影響に関する研究」, 土木学会論文集 D Vol.64 No.1, 1-10, 2008.
- [52] 浅森智子, 垂水弘夫, 「世帯の高齢化を考慮した住宅エネルギーシステムの評価」, 日本建築学会環境系論文集, 618, 2007.
- [53] 東京都市圏交通計画協議会, 「パーソントリップ調査」, <http://www.tokyo-pt.jp/index.html> (アクセス日 2013.5).
- [54] 薄井智貴, 金杉洋, 関本義秀, 南佳孝, 柴崎亮介, 中野敦, 「動線解析プラットフォームによる東京都市圏パーソントリップ調査データの時空間内挿の実現とその利用」, 第18回地理情報システム学会講演論文集, Vol.18, pp.541-545, 2009.
- [55] 国立社会保障・人口問題研究所, 「日本の将来推計人口(平成24年1月推計)」, 2013.
- [56] 国立社会保障・人口問題研究所, 「人口統計資料集2013年版」, 2013.
- [57] 厚生労働省, 「第9回 21世紀成年者縦断調査(2010年)」, 2012.
- [58] 総務省統計局, 「平成22年国勢調査」, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/> (アクセス日 2013.6).
- [59] 竹内伝史ほか, 「地域交通の計画 政策と工学」, 鹿島出版会, 2011.
- [60] NHK放送文化研究所, 「2010年国民生活時間調査報告書」, 2011.2.
- [61] 日本建築学会住宅内のエネルギー消費量に関する調査研究委員会, 「用途別総エネルギー消費量(2003年)」  
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/japan2/index.htm> (アクセス日 2013.6).
- [62] 榊原幸夫, 「家庭部門のエネルギー消費実態について」, エネルギー経済 26(2), 17-35, 2000.
- [63] 資源エネルギー庁(委託調査), 「平成23年度エネルギー消費状況調査(民生部門エネルギー消費実態調査)」, 2012.3.
- [64] 柏木孝夫(監修), 日本エネルギー学会(編集), 「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル」, 日本工業出版, 2008.
- [65] 吉田由紀子ほか, 「BEMSを用いた業務対策の実態と総合評価手法について 家庭・業務部門の温暖化対策」, CGER-Report CGER-I079-2008, 2008.
- [66] 財団法人日本建設情報総合センター, 「100mメッシュ延床面積データ」, <http://www.jacic.or.jp/books/images/TOP.htm> (アクセス日 2013.3).

- [67] 国土交通省国土政策局, 「国土数値情報 都道府県地価調査データ」,  
[http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L02-v2\\_1.html](http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L02-v2_1.html) (アクセス日 2013.4).
- [68] 腰塚武志, 小林純一, 「道路距離と直線距離」, 都市計画 別冊 (18), p43-48, 1983.11.
- [69] 松橋啓介, 工藤祐揮, 上岡直見, 森口祐一, 「市区町村の運輸部門 CO2 排出量の推計手法に関する比較研究」, 環境システム研究論文集 Vol. 32, 2004.10.
- [70] 資源エネルギー庁, 「都道府県別エネルギー消費統計」,  
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/regional-energy/> (アクセス日 2013.6).
- [71] 国土交通省 都市局, 「都市における人の動き (平成 22 年全国都市交通特性調査集計結果から)」, 平成 24 年 8 月.

## 2.2. モデルを用いた試算

前節で説明したエネルギーサービス需要推計モデルについて、パラメータ設定が結果に与える感度の分析を行った。また、モデルを用いて、住宅や地区におけるエネルギーサービス需要の長期変化の試算を行った。

### 2.2.1. パラメータの不確実性と感度

#### (1) パラメータの不確実性

将来人口・世帯構成、個人の在宅・外出の推計、エネルギーサービス需要の推計においては、一部を除いてパラメータが長期的に変化しないことを前提としているが、今後生じる可能性があり、推計結果に影響を与え得る事項と、ここで扱う感度分析の内容について、表 2-11 にまとめた。

表 2-11 エネルギーサービス需要推計におけるパラメータの不確実性

	推計結果に影響を与え得る事項	基本設定における仮定	感度分析	需要に与える影響
人口・世帯構成の推計	少子高齢化対策により出生率が向上する。	合計特殊出生率 1.4 で一定として年齢別出生確率を想定	人口問題研究所推計の推計[36]を参考に、2030年までに線形で1.6に改善するとして年齢別出生確率を想定(図 2-21)	需要の増加
	高齢者・女性の労働力化率の上昇により、年齢・性別の職業構成が変化する。	年齢・性別の労働力率が一定	独立行政法人労働政策研究・研修機構の推計[72]を参考に、2030年までの線形の労働力率向上を想定(図 2-24)	家庭需要の減少、業務需要の増加
個人の在宅・外出の推計	同職業でも、高齢者免許保有率の上昇等により、一人あたりの外出数の増加が生じる。	同職業の外出率は一定	「主婦等 2」(高年の主婦・主夫・無職者)の外出率が、2030年までに「主婦等 1」(若中年の主婦・主夫・無職者)の外出率に線形で近付くと想定(図 2-24)	家庭需要の減少、移動需要の増加
エネルギーサービス需要の推計	使用電気機器の増加、全館冷暖房の普及などにより、より高いエネルギーサービス水準が要求される。	エネルギーサービスの要求水準が変化しない	2010年から2030年までに全館24時間冷暖房を行う(世帯全員の起床在宅時と同じと冷暖房需要発生)世帯が5年に25%ずつ増加する	家庭需要の増加

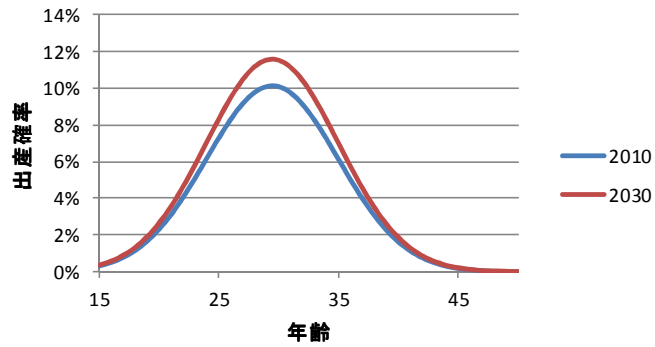


図 2-21 出生確率の変化の想定

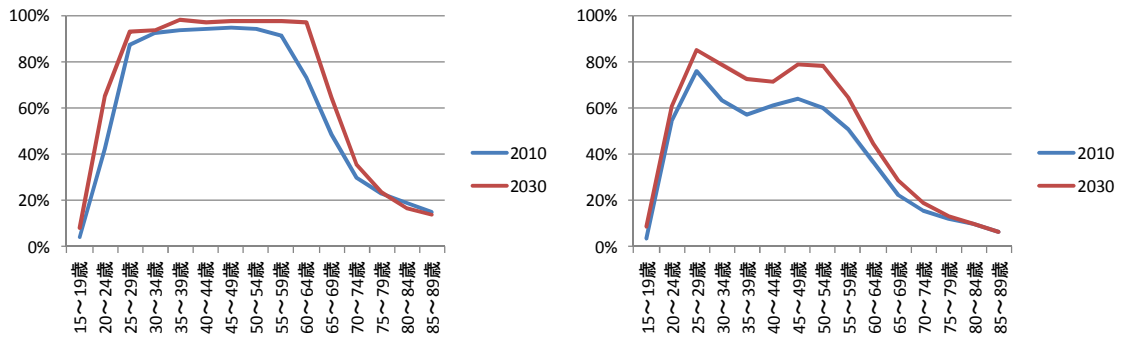


図 2-22 年齢階層別労働力率の変化の想定

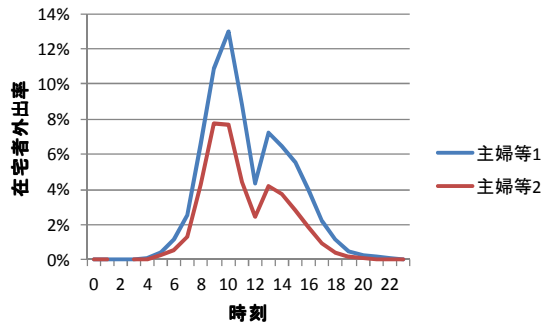


図 2-23 各時間在宅者が外出する確率の変化の想定

## (2) 感度分析結果と考察

東京都心に近く近年再開発が進んでいる住宅・業務地区である T 地区（表 2-12）を対象として、表 2-11 に挙げた事項に関する感度分析を行った。

表 2-12 分析対象の地区

		T 地区
面積[ha]		246
人口 (2013 年) [千人]		28
平均世帯人員 (2013 年)		2.30
人口構成	0～14 歳	19%
	15～59 歳	63%
	60 歳～	15%

家庭部門のエネルギーサービス需要に影響するパラメータを変更した際の、家庭部門のエネルギーサービス需要の変化を表 2-13 に示す。

合計特殊出生率の向上、労働力率の向上、高齢者外出率の向上などは、エネルギーサービス需要の推計結果にほとんど影響しない。これらの想定が適用される人数が全体に占める比率自体が高くないためである。

一方で、エネルギーサービスの要求水準の変化は如実に影響する。ここでは「2010 年から 2030 年までに全館 24 時間冷暖房を行う世帯が 5 年に 25% ずつ増加」することを想定したが、この場合、エネルギーサービス需要は人口の横ばい傾向を上回って増加を続け、冷暖房要求水準が現在と同様の場合に比較するとエネルギーサービス需要は 2 割程度増加することが判った。一方で、住宅の断熱性能が向上することは、エネルギーサービス需要の減少要因となる。例えば住宅の断熱性能が昭和 55 年省エネ基準以前のものと、平成 11 年基準適合のものを比較すると、冷暖房用エネルギー消費は約 2 分の 1、住宅全体では約 75% になると試算されている[73]。

先行研究では、2050 年までの日本の家庭部門エネルギーサービス需要に関して、以下のような見通しを示している。

- ・ サービス需要の増加分を世帯数減少がほぼ相殺する。利便性の高い生活を追及するシナリオも、冷暖房需要や家電製品利用が増える一方で、外食率や集合住宅率の増加によってエネルギーサービス需要が抑制され、ゆとり生活を嗜好するシナリオと世帯当たりのサービス需要が同程度。[74]
- ・ 人口、世帯数の減少に伴い、各種サービス需要の伸びが軟調に推移[75]

本試算結果では、冷暖房需要では、断熱性能強化を伴わずに全住宅で 24 時間冷暖房が行われたとしても、平均的な地区での熱需要（暖房需要、冷房需要）は 2050 年には 2010 年から数十%の微増に留まった。断熱性能の強化も伴えば、熱需要は今後一時的に増加することがあっても、長期的には横ばい～減少トレンドになると予測される。

表 2-13 感度分析結果

	基本設定における仮定	感度分析
人口・世帯構成の推計	合計特殊出生率 1.4 	合計特殊出生率 2030年までに線形で 1.6 に改善 
	年齢・性別の労働力率が一定 	2030年までの線形の労働力率向上を想定 
個人の在宅・外出の推計	同職業の外出率は一定 	「主婦等 2」の外出率が、2030年までに「主婦等 1」の外出率に線形で近付くと想定 
	エネルギーサービスの要求水準が変化しない 	2010年から2030年までに全館 24 時間冷暖房を行う世帯が 5 年に 25% ずつ増加 



## 2.2.2. 住宅や地区におけるエネルギーサービス需要の長期変化の試算

### (1) 特定の住宅における変化

#### 1) 対象住宅の概要

2010年時点で核家族が入居した新築住宅を想定し、今後50年間で、この住宅の居住者やそのエネルギー需要がどのように変化し得るかを、上述のモデルを用いて推計した。

対象とする核家族世帯の、2010年時点での人員構成を表2-14のとおりとする。当初の核家族世帯のうち、父母は転居を行わないものと仮定している。

人口・世帯動態モデルの世帯人員異動に関するパラメータは、国立社会保障・人口問題研究所における全国中位推計[55]の推移に整合するよう調整したものをを用いた。移動需要の推計は、当住宅は都心地域に立地しているものとして推計した。

表 2-14 世帯人員構成の想定

性別	続柄	年齢	職業
男	父	35	他サービス業従事者
女	母	35	販売従事者
男	子	6	小中学生
女	子	2	主婦等 1

#### 2) 推計結果

この世帯の50年間の変化を、人口・世帯動態モデルを用いて推計した。1000回試行を行った際の世帯人員構成の分布と、世帯人員の期待値を図2-24に示す。平均世帯人員は、第二子が成人する20年後ごろから低下し始め、50年後には2人程度になる。このとき、親1人・子1人の2人世帯となっている確率が高い。

住宅のエネルギーサービス需要の推移は図2-25のように推計される。子が成人するまでの15年以内には大きくは変化しないが、その後は平均世帯人数の低下に伴い、エネルギーサービス需要も減少する。世帯人員が2020年から2060年で平均43%減少する際、平均のエネルギーサービス需要減少は、冷暖房需要は26%、給湯需要は29%、ベース電力・その他需要は23%、移動需要は57%、全体では30%である。

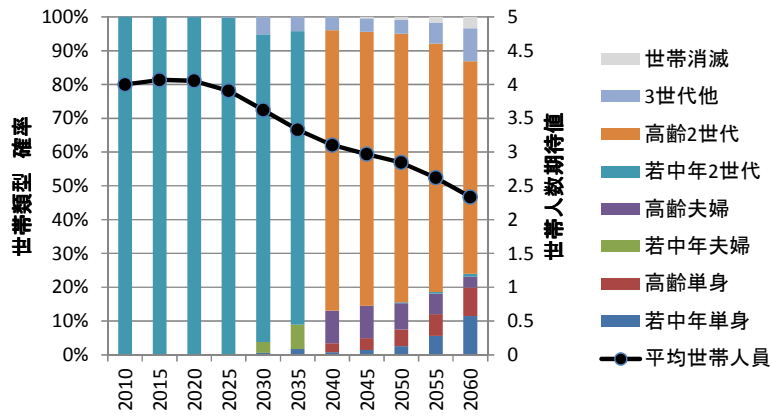
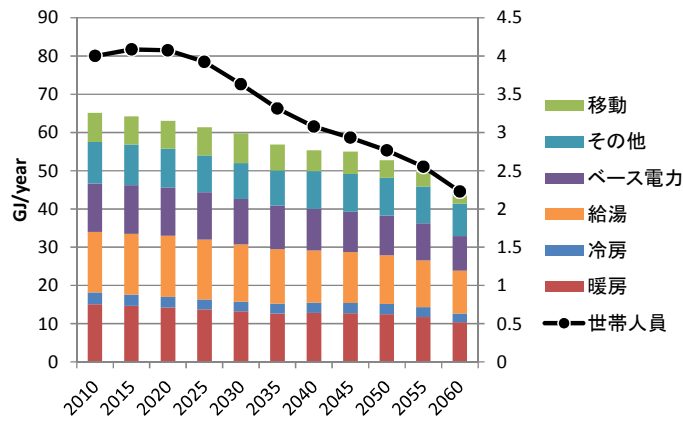
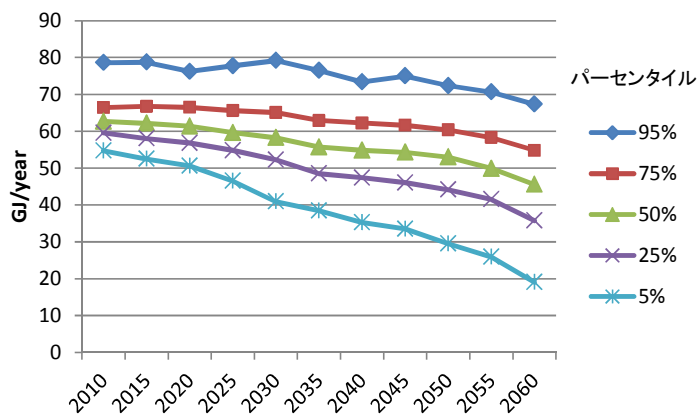


図 2-24 特定の住宅に居住する世帯の変化

世帯類型の定義は表 2-10 のとおり。



a) 平均値と用途別内訳



b) 需要の分布

図 2-25 特定の住宅におけるエネルギー需要の変化

## (2) 地区における変化

### 1) 対象地区の概要

2つの地区（町レベル）を対象に、今後50年間で、この地区の居住者構成やその家庭でのエネルギー需要がどのように変化し得るかを、上述のモデルを用いて推計した。本推計は、実際の地区の将来推計を行うことが目的ではなく、地区の特性の違いによりエネルギー需要に違いが生じることを示すことを目的としている。

東京都心に近く近年再開発が進んでいる住宅・業務地区であるT地区と、東京郊外の1970年代開発の住宅地であるN地区を対象とした。地区の概要を表2-15に示す。

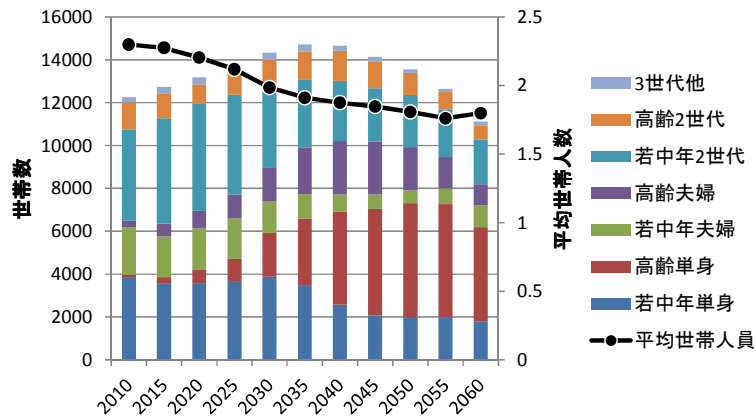
表 2-15 分析対象の地区

		T地区	N地区
面積[ha]		246	182
人口(2013年)[千人]		28	16
平均世帯人員(2013年)		2.30	2.09
人口構成	0～14歳	19%	11%
	15～59歳	63%	50%
	60歳～	15%	36%

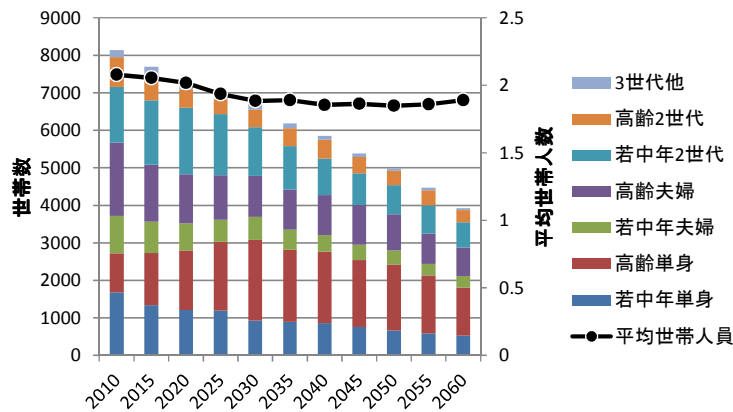
これらの地区は個人行動モデルにおける「ゾーン」よりも狭い地域を指している。個人行動における目的地選択確率は所属するゾーンと同じとするが、人口・世帯数については当該地区の値を使用した。また、建物延床面積は100mメッシュ延床面積を再集計して算出したが、当該データが平成17年のものであること、用途別の振り分けについては前述の手法では解像度が低いことから、地区の現状に応じて調整を行っている。

ここでは、両地区とも、地域外との人口異動は転出と転入が相殺されるものと想定した。この想定に基づき、地区内の人口・世帯の将来変化を推計した結果を図2-26に示す。

また、個人行動モデルに必要なパラメータとして、その他のゾーンの人口は、国立社会保障・人口問題研究所[55]による年齢階層別増減率を当てはめて推計し、ゾーン別の建物用途への適合性は将来も変化しないものと想定した。エネルギー需要推計に必要なパラメータとして、建物延床面積は、住宅は世帯数に比例、事務所・店舗は個人行動モデルから推計される13時人口に比例するものとして、現在からの増減を推計した。



a) T 地区



b) N 地区

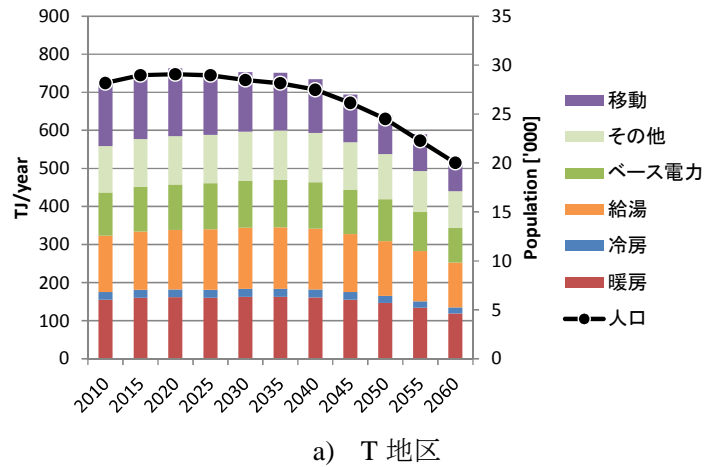
図 2-26 地区に居住する世帯構成の変化

世帯類型の定義は表 2-10 のとおり。

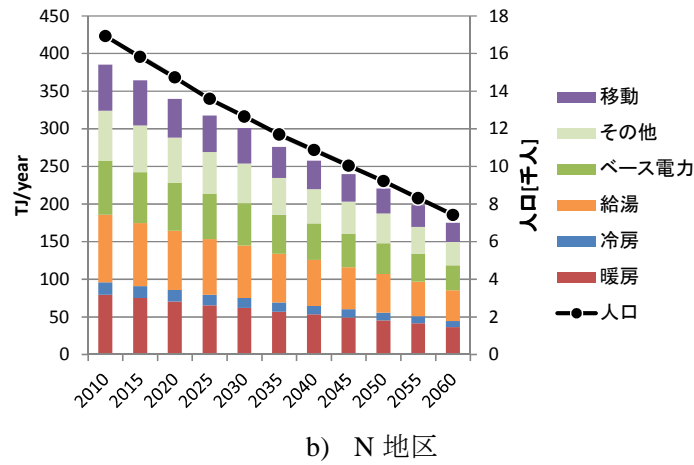
## 2) 推計結果

各地区の 50 年間のエネルギーサービス需要の変化を図 2-27 に示す。T 地区は N 地区に 30 年ほど遅れて人口減少が進展しはじめる。この差は各地区が住宅地として開発・再開発された年代の差によるものである。

エネルギーサービス需要も人口減少に伴って減少するが、平均世帯人員の減少も伴う T 地区では、今後 25 年間では人口が約 2 割減少する一方で、エネルギー需要はほぼ横ばいで推移する。これは世帯人員が減少すると一人あたりエネルギー需要は増大する性質によるため、推計モデル中では表 2-5 における逓減指数  $\alpha$  として表現している。人口減少は直ちにエネルギー需要減少につながらないことを示している。



a) T 地区



b) N 地区

図 2-27 地区における家庭エネルギーサービス需要の変化

移動需要としては、地区の住民による移動（地区外移動を含む）分を計上。

### 2.2.3. 本節のまとめ

エネルギーサービス需要の感度分析を行い、エネルギーサービスの要求水準の想定が結果に与える影響が大きいことを確認した。

本モデルを用いたエネルギーサービス需要の試算結果によると、特定の世帯に着目したとき、世帯構成員の年齢変化に起因するエネルギーサービス需要の変化は、年間1%程度であった。また、人口減少によりエネルギーサービス需要は減少し、平均的な地区においてもエネルギーサービスの要求水準の増加を伴わなければ、2030年ごろに減少に転じ、特に冷暖房需要の増加は長期的には見込みにくいことを示した。

## 参考文献

- [72] 独立行政法人労働政策研究・研修機構, 「労働力需給の推計ー労働力需給モデル(2004年版)による将来推計ー」, JILPT 資料シリーズ No.6, 2005.8.
- [73] 国土交通省, 「省エネルギー基準改正の概要」, 2014.
- [74] 藤野純一, 日比野剛, 榎原友樹, 松岡譲, 増井利彦, 甲斐沼美紀子, 「低炭素社会のシナリオとその実現の可能性」, 地球環境 Vol.12 No.2 153-160, 2007.
- [75] 小宮山涼一, 鈴木研悟, 永富悠, 松尾雄司, 末広茂, 「福島原発事故を踏まえた 2050 年までの日本の原子力シナリオに関する分析」, エネルギー経済 37(4), 29-41, 2011.

## 2.3. エネルギーサービス需要の長期的変化による影響

前節では地区のエネルギーサービス需要の長期的変化を推計するモデルを構築した。家庭・地域に対するエネルギー技術の適用には、このような減少を含む長期的需要変化によって経済性・省エネルギー性等の効果が異なってくる可能性がある。例えば、以下のような事項が考えられる。

- ・ 移動需要が高齢化等により変化すれば、電気自動車を太陽光発電の蓄電池として利用する際の最適な運用方法が変化し得る。
- ・ 住宅にエネルギーシステム変更が柔軟に行えるような設備を予め配しておくこと、住宅のライフサイクルを通じた省エネルギーが図れる可能性がある。
- ・ 省エネ投資の初期負担を融資し光熱費削減分で弁済させるといった施策スキーム（グリーンディール）においては、将来の光熱費削減分の変動がリスク要因となる。
- ・ 地域熱供給の導入においては、家庭は景気変動の短期的影響を受けにくい需要である一方、人口の異動の小さい分譲型住宅が中心を占める地域では長期的に減少する可能性があり、事業性に影響を与える。
- ・ 世帯のライフステージに応じた郊外の戸建住宅と都心の集合住宅などの住み替えの推進が、エネルギーインフラの効率的利用や省エネルギーにもつながる可能性がある。

ここでは、世帯内の加齢に伴う人員構成変化による、住宅からの太陽光発電の余剰電力の発生、家庭用省エネルギー給湯システムの投資回収可能性への影響分析を行う。

### 2.3.1. 住宅からの太陽光発電余剰電力の発生状況

#### (1) 背景

住宅に設置された太陽光発電設備からの余剰電力発生は、配電線電圧の上昇の原因となり、また太陽光発電の普及が拡大した場合には中間季には電力システム全体にて供給過多となる場合もある。余剰として発生し得る電力は、蓄電池のみでなく、電気自動車(PHEV/EV)のバッテリーへの充電、蓄熱槽を持つヒートポンプ式給湯器における蓄熱等に用いることにより、逆潮流を抑制することが可能であると見られている[76]。ここでは、配電線電圧に影響を与える、ローカルなレベルでの余剰電力発生状況に着目する。

前節で述べた世帯のエネルギー需要モデルを用いて、長期的な余剰電力発生量の推移や、統合的な家庭内需要・電気自動車充電需要を用いた電化状況の違いによる余剰電力発生量の違いを分析する。

なお、太陽光発電と電気自動車・ヒートポンプ等の連携については、技術的な可能性を検証したものとしては[77]等、また太陽光発電と電気自動車またはヒートポンプの連携効果を家庭の需要発生に着目して分析したものとしては[78]等、電気自動車の需要推計を精密に

行ったものとしては[79]等があるが、これまで家庭内需要と移動需要を統合的に勘案して余剰電力発生を評価したものはなかった。

## (2) 分析の前提

千葉県の新興住宅地エリアを対象として、前述のシミュレーションモデルを用いて、2000人・約800世帯分の25年分・5時点（便宜上2010年、2015年、2020年、2025年、2030年と表記する）の家庭内・移動エネルギーサービス需要を推計した。エネルギーサービス需要データは、月別・日別・時刻別に作成した（ただし、移動に関する統計の制約により、休平日の差は反映されていない）。

世帯類型別の構成と平均世帯人員の推移を図2-28、全体のエネルギー需要の推移を図2-29に示す。2010年では若年層の居住が大半を占めている地域であり、全世帯のうち4割が単身世帯である。2030年にかけて、緩やかに親世代の高齢化や子供の独立が進展していく。

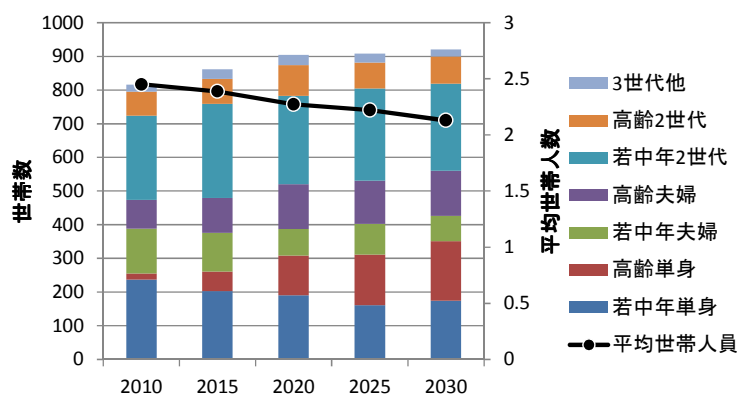


図 2-28 世帯類型別の構成と平均世帯人員の推移

世帯類型の定義は表 2-10 のとおり。

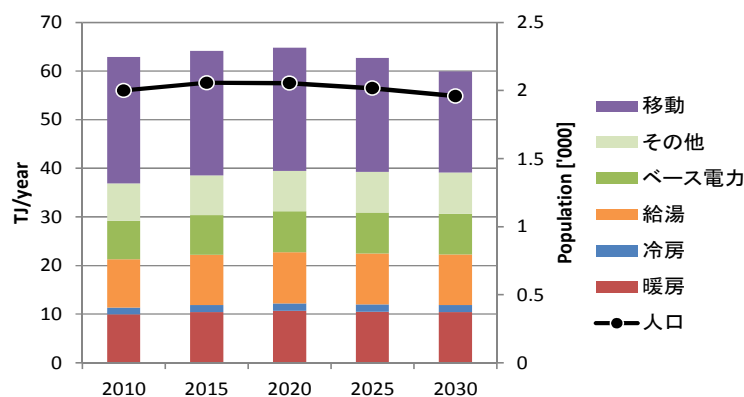


図 2-29 エネルギー需要の推移



太陽光発電の単位容量あたり発電量は、2012年10月1日～2013年9月30日の1年間の日別・時刻別の千葉県柏市における実測値データを用いた。エネルギー需要の推計に用いる気温データは、同期中の千葉県我孫子観測所における値を適用した。

余剰電力発生量は、日別・時刻別に需要との差分として算出したものを累積した。

### (3) 需要推計モデルの検証と補正

資源エネルギー庁調べ[80]では、一般に家庭からの太陽光発電余剰電力発生比率（年間発電量に占める年間余剰電力の比率）は平均で発電量の5～6割程度とされているが、世帯によって大きな幅があることも示されている（図2-30）。これを、本シミュレーションを用いて推計される世帯別の余剰電力量と比較し、推計された家庭内需要の世帯別のばらつきの再現程度について検証する。

家庭内の暖房・冷房・給湯・動力（ベース、その他）・移動需要のうち、暖房・冷房・動力が電力で賄われているとした（表2-9）。また、太陽光発電が設置されるのは2人以上世帯のみとし、その容量は4kWであるとした。なお、2030年以前に当初世帯が消滅するものは対象に含めない。

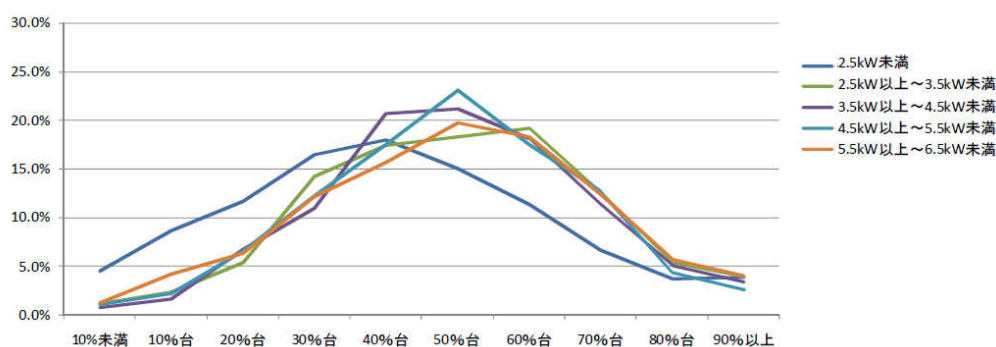


図 2-30 住宅用太陽光発電設備における余剰電力比率分布[80]

表 2-16 比較において想定する電化率と最終需要機器の効率

	電化率	電化時の効率
暖房	1	4
冷房	1	3
給湯	0	—
ベース動力	1	1
その他動力等	1	1
移動	0	—

推計結果と、図2-30で示した実際（資源エネルギー庁調べ）の余剰電力比率（3.5～4.5kW設置の場合）の比較を図2-31に示す。

推計結果の平均余剰電力発生比率は48%、一方の資源エネルギー庁調べでは55%である。

この平均値の差について、実際は余剰電力買取制度の存在から日中の省エネインセンティブが働いていることが考えられる。また、推計結果の分布は平均値付近で急峻である一方、実際はよりなだらかな推移を示している。これは、推計では世帯人員の行動の違いに着目したばらつきは表現できるが、それ以外のばらつき（機器の効率、冷暖房への嗜好、家電機器の保有等）については考慮していないためである。

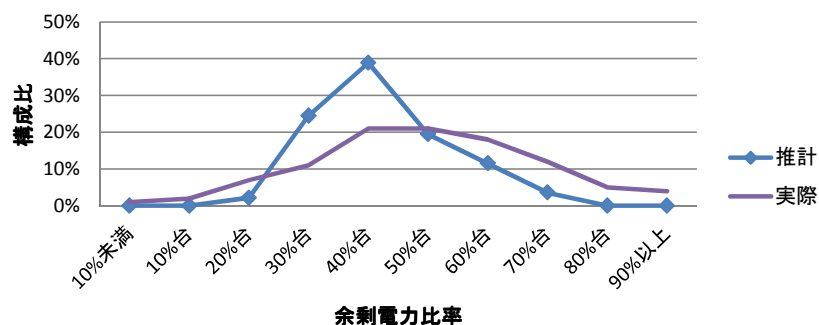


図 2-31 余剰電力比率分布の検証

実際： [80]より、3.5～4.5kW 設置の場合の余剰電力比率。

考慮していないエネルギー需要のばらつきを勘案するには、各要素の分布を詳細にモデル化する方法と、これらを総合してランダムにばらつかせる方法とがある。

後者の方法で、世帯別・用途別に、対数正規分布 $LN(-0.2, \sqrt{0.4})$ に従うランダムな係数（平均は 1、分散は約 0.49。この対数の分布は平均 $-0.2 \cdot$  標準偏差 $\sqrt{0.4}$  の正規分布に従う）を乗じることでこのばらつきを表現したところ、余剰電力比率分布は図 2-32 のとおりとなり、実際と類似する分布を示した。余剰電力比率の平均は 49%となった。

以降の分析では、このばらつきを考慮した後のモデルを用いる。

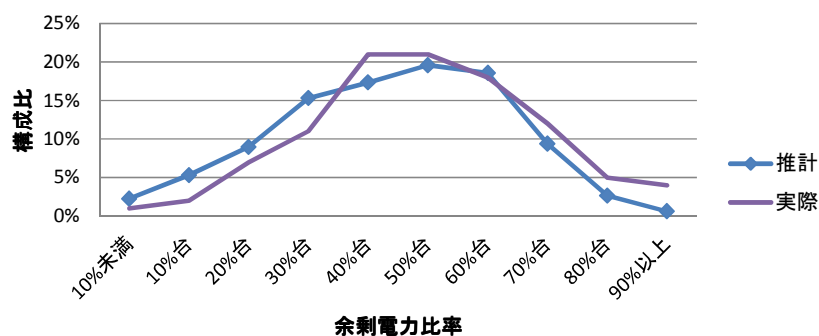


図 2-32 余剰電力比率分布の検証(機器効率等のばらつき考慮後)

#### (4) 世帯類型別の余剰電力発生

ここでは、余剰電力の発生量とその経年変化を、世帯類型別に見ていく。世帯類型の定義は表 2-10 で示したとおりである。なお、単身世帯は太陽光発電設置の対象外であり、ま

た「その他」世帯は該当数が少ないために示していない。

前項と同様に、家庭内の暖房・冷房・給湯・動力（ベース、その他）・移動需要のうち、暖房・冷房・動力が電力で賄われているとした（表 2-9）。また、太陽光発電が設置されるのは 2010 年時点で世帯人員が 2 人以上の世帯のみとし、その容量は 4kW であるとした。このときの、余剰電力発生の平均比率の推移を、2010 年時点での世帯類型別に図 2-33 に示す。

全体での余剰電力比率は、45%から 55%へ増加するが、その中でも、2010 年時点で中年 2 世代、高齢 2 世代の世帯での子供の独立等による世帯人員の減少による変化が大きく、25 年間で 10 ポイント以上増加し得る。若年夫婦では逆に、子供の増加により当初 10 年間で 10%ポイント近く余剰電力が減少する。

図 2-34 は、2010 年と 2030 年の余剰電力比率の変化の分布を示したものである。世帯によっては 10%ポイント以上の変化が生じる場合もある。

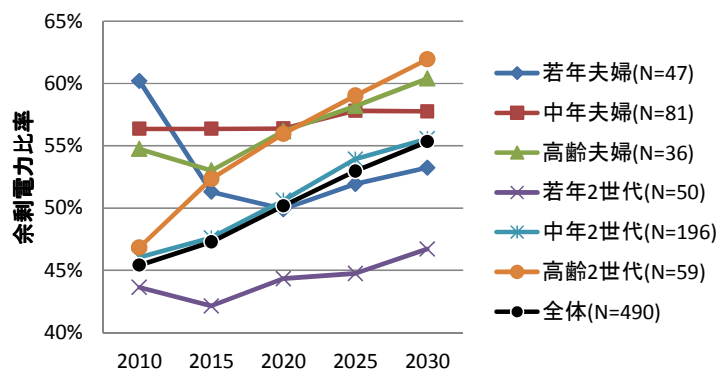


図 2-33 余剰電力比率平均の推移

表 2-10 における世帯類型のうち、若中年夫婦と若中年 2 世代を、最高齢者が 45 歳未満・以上かどうかで若年・中年に区別。

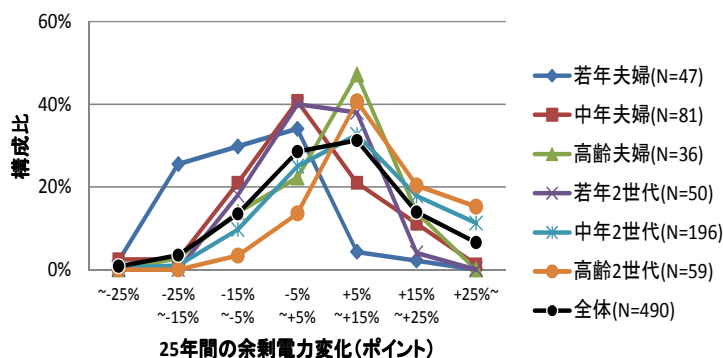


図 2-34 25 年間の余剰電力比率変化(ポイント)

## (5) 電化状況別の余剰電力発生

家庭内の電化の進展、すなわちエネルギーサービス需要のうち電力で供給されるものが増加すれば、余剰電力発生量を抑制することができる。ここでは、家庭内電化による余剰電力抑制のポテンシャルについて分析する。

エネルギーサービス需要のうち、電力で供給されるものについて、表 2-17 に挙げるように想定した。シナリオ 1 は、冷房・動力需要が電力で供給されるとした場合である。シナリオ 2 は、前項までの想定であり、暖房を電力で供給する。

シナリオ 3 では、シナリオ 2 に加えて蓄熱機能のあるヒートポンプ式給湯機器を用いて、当日の給湯需要を電力で供給する。シナリオ 4 では、シナリオ 2 に加えて電気自動車の蓄電池を用いて、移動需要を電力で供給する。シナリオ 5 は給湯器への蓄熱と電気自動車への充電を両方行った場合である。シナリオ 6 は、さらに電気自動車からの住宅への放電も可能とし、冷暖房・動力需要を満たす分の電力も充電可能とする。

シナリオ 4 とシナリオ 6 において、日中在宅しない通勤・通学用車では太陽光発電の余剰電力による充電目的を果たさないことから、表 2-1 で示した職業区分のうち「農業等従事者 1」「農業等従事者 2」「主婦等 1」「主婦等 2」のみを対象とし、これらの人員が在宅時に充電を行うものとする。太陽光発電余剰電力による電気自動車の充電可能量は最大 8kWh とした。

蓄電や蓄熱は当日の深夜までに使い切り、翌日以降には持ち越されないとする。この運用は、余剰電力買取価格が夕刻の電力料金より安く、また夕刻の電力料金よりも深夜の電力料金が安い場合には世帯にとっても経済的となる。また、いずれも蓄電や蓄熱によるロスを考慮していない。

表 2-17 家庭の電化シナリオ

	シナリオ 1 暖房非電化	シナリオ 2 標準	シナリオ 3 電気給湯	シナリオ 4 電気自動車 (充電のみ)
暖房	0	1	1	1
冷房	1	1	1	1
給湯	0	0	1 <sup>*1</sup>	0
ベース動力	1	1	1	1
その他動力等	1	1	1	1
移動	0	0	0	1 <sup>*2</sup>

	シナリオ 5 電気給湯・電気自動車 (充電のみ)	シナリオ 6 電気給湯・電気自動車 (充放電)	電化時の効率
暖房	1	1	4
冷房	1	1	3
給湯	1 <sup>*1</sup>	1 <sup>*1</sup>	3
ベース動力	1	1	1
その他動力等	1	1	1
移動	1 <sup>*2</sup>	1 <sup>*2</sup>	4

\*1 需要発生時間前の時刻に蓄熱

\*2 需要発生時間前の時刻に充電。職業区分「農業等従事者 1」「農業等従事者 2」「主婦等 1」「主婦等 2」による移動のみ対象

以上のシナリオ別の余剰電力を、表 2-10 で示した世帯類型別に図 2-35 に示す。また、図 2-36 にはそれぞれのシナリオの標準（暖房・冷房・動力を電力で供給するシナリオ）との差を示す。また、図 2-37 には、月別の全世界帯平均の余剰電力比率を示す。

暖房が電化されていることは、冬季において余剰電力を 10%ポイント程度押し下げる。この影響は在宅時間の長い高齢者世帯で大きいですが、年間では 5%ポイント程度である。電気給湯は 10~15%ポイント程度、電気自動車は 5%ポイント前後の効果がある。昼間在宅時間の長い高齢夫婦・高齢 2 世代では電気自動車の、昼間在宅時間の短い若中年夫婦・若中年 2 世代では電気給湯の効果が、世帯類型間の比較において大きい。電気給湯と電気自動車の併用は二つの効果の一部を相殺し、効果は 15%~20%ポイント程度である。電気自動車から住宅に放電可能であればさらに 10%ポイント前後の効果があり、これも昼間在宅時間の長い高齢夫婦・高齢 2 世代世帯において大きい。

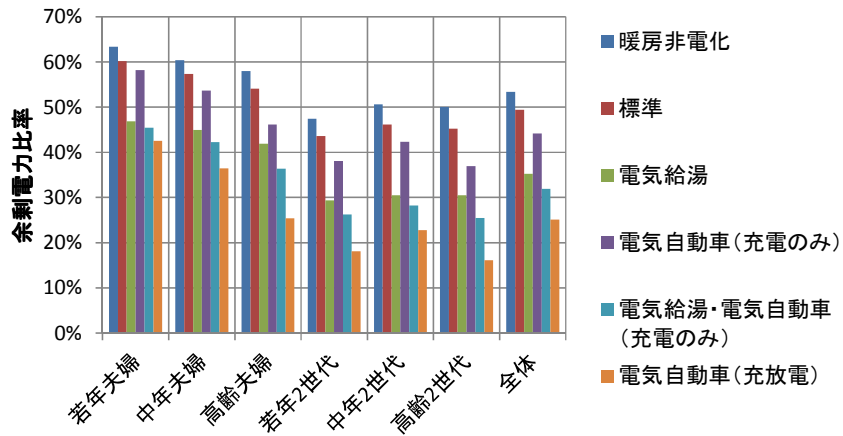


図 2-35 シナリオ別・世帯類型別の余剰電力比率

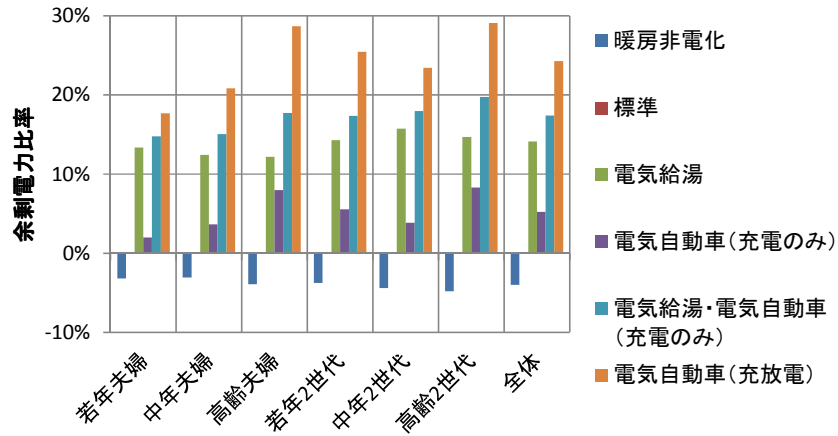


図 2-36 シナリオ別・世帯類型別の余剰電力比率(標準との差)

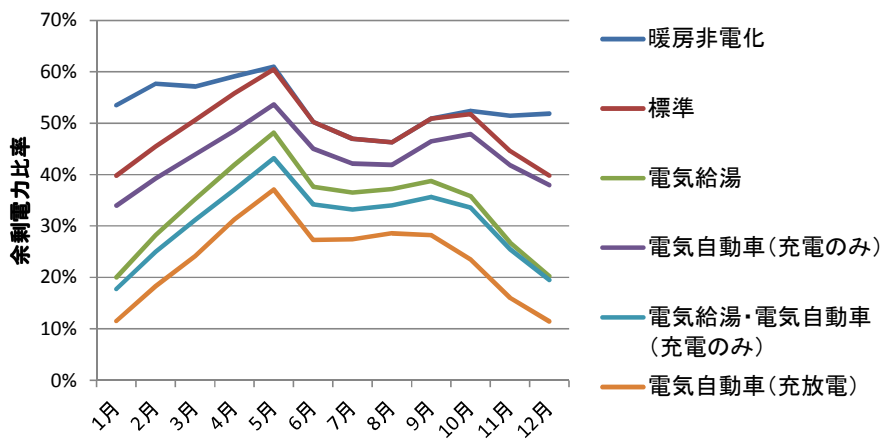


図 2-37 シナリオ別・月別の余剰電力比率(全世界帯平均)

## (6) 結論

本項では、住宅の太陽光発電から発生する余剰電力について、エネルギーサービス需要から見た余剰電力削減のポテンシャルを示した。住宅別の需要の長期的な変化による影響分析や、家庭内需要と移動需要の統合的な検討を行ったことが特徴である。

発生する余剰電力は、世帯人員の加齢や異動によるエネルギーサービス需要の変化によって変化する。全体では10年で3%ポイント、25年で5%ポイント程度であるが、特に長期では高齢者の死亡や子供の独立による世帯人員が減少する世帯では、25年で10%ポイント程度の余剰電力率が増加する。なお、ここでは考慮していない家電機器の効率化、逆に家電機器の需要増加の影響も受ける。現在の太陽光発電の余剰電力買取制度は、余剰電力比率を6割としたときの10年間で投資回収が可能となる水準で価格を決定しているが、若年夫婦など今後子供の数が増える場合を除いて余剰電力比率は増加の傾向にあり、余剰電力比率の変化が投資回収可能性を大きく損なうことは少ない。また、複数世帯が集まった配電システムとして見れば、ここで示したような世帯人員の加齢や異動による余剰電力発生量の変化よりも、太陽光発電の普及進展自体に伴う余剰電力発生量の変化の影響のほうが大きいと考えられる。

太陽光発電余剰電力を吸収する需要として、冬季は暖房需要の電化、また電気給湯器や電気自動車での蓄熱・蓄電利用が有効である。昼間在宅時間の長い世帯では電気自動車、短い世帯では電気給湯器での利用との親和性が高い。しかし、いずれにせよ吸収できない余剰電力が2割程度発生する。

ただし、ここで示したポテンシャルは、需要発生と太陽光発電の発電量が既知の場合に発揮されるものである。また、余剰電力買取価格や時間帯別電力料金によっては、余剰電力を削減しようとするインセンティブが家庭に働かず、このポテンシャルが発揮されないことには留意が必要である。

### 2.3.2. 家庭用省エネルギー給湯システムの投資回収可能性の分析

#### (1) 背景

家庭のエネルギーサービス需要の約3割を給湯需要が占めており、給湯の省エネルギーは家庭の省エネルギーにとって重要である。高効率給湯器として、夜間電力の安価な料金体系への変更を伴うヒートポンプ式給湯器、熱電併給を行うコジェネレーションといった給湯システムがあるが、これらは時間の経過に伴う世帯のエネルギー需要の時間分布や熱電比の変化によって、省エネルギー性や投資回収可能性が変化する可能性がある。このため、給湯システム導入当初の給湯需要に基づいた判断ではなく、長期的な変化を踏まえた上で、給湯システムを選択することが重要である。

本節で述べた世帯のエネルギー需要モデルを用いて、長期的な給湯需要の変化と、それに伴う給湯システムの選択性の変化について、経済性と二酸化炭素削減可能性の観点から

分析する。

## (2) 分析の前提

前節の分析と同様、千葉県の新しい住宅地エリアを対象として、前述のシミュレーションモデルを用いて、500人・約230世帯分の25年分・5時点（便宜上2010年、2015年、2020年、2025年、2030年と表記する）の家庭内・移動エネルギーサービス需要を推計した。エネルギーサービス需要データは、月別・日別・時刻別に作成した（ただし、移動に関する統計の制約により、休平日の差は反映されていない）。

これらの世帯に対し、表2-18に示す3種類の給湯システムを適用し、その際のエネルギー消費量と追加投資費用・光熱費削減価格を、表2-19、表2-20の想定を用いて算出した。エネルギー料金は、エネルギーサービス需要の将来変化に着目するため、将来も一定であるとした。エネルギーサービス需要の発生、エネルギー料金メニューの違いによる違い（例えばオール電化システム採用の家で、早朝・夜間に生活家電の使用がシフトするなど）は考慮せず、どの場合も同じ需要を仮定した。

全ての機器は、消費したエネルギー量に比例した量のエネルギーサービスを供給するものであるとし、それ以外の非線形の損失や動特性は考慮していない。エネルギーサービス需要の推計に合わせ、各機器システムの稼働を1時間ごとに決定する。

ヒートポンプ式給湯器は、蓄熱機能のある給湯器である。このため、将来の給湯負荷を予測した上で稼働する必要がある、負荷の予測精度が低ければ過剰稼働もしくは低効率な補助熱源の利用を伴うため、省エネルギー性・光熱費削減効果ともに低くなる。ここでは、給湯需要の予測精度の違いによる影響を排するために、24時間以内の給湯需要は常に予測可能として、補助熱源は、当時間の熱需要が蓄熱容量を上回る場合のみに使用されるものとした。具体的には、将来24時間の給湯需要を毎時間確認し、現時間に稼働せず、かつ残りの時間（ヒートポンプ式給湯器は23～6時のみ）を常に稼働しても、将来24時間以内に湯切れが生じるのであれば、現時間帯は稼働を行うものとしている。

コジェネレーションシステムは、熱源は固体酸化物型燃料電池(SOFC)とし、熱需要に関わらず、電力需要に追随して運転が行われるものとした。



表 2-18 給湯システム等の前提

	従来システム	高効率ガス給湯器	オール電化システム	コージェネシステム (SOFC)
暖房	エアコン	エアコン	エアコン	エアコン
冷房	エアコン	エアコン	エアコン	エアコン
給湯	ガス給湯器	潜熱回収型ガス給湯器	ヒートポンプ式給湯器 (補助熱源：電気ヒータ)	家庭用コージェネレーション (補助熱源：ガス給湯器)
動力	系統電力	系統電力	系統電力	コージェネ自家発電電力 +系統電力

表 2-19 各機器の想定

	効率(HHV)	容量	イニシャルコスト
エアコン (暖房)	4	—	追加費用なし
温水床暖房	1 (温水製造除く)	—	追加費用なし
エアコン (冷房)	3	—	—
ガス給湯器	0.8	制限なし	35 万円
潜熱回収型ガス給湯器	0.95	制限なし	41 万円
電気ヒータ	1	制限なし	—
ヒートポンプ式給湯器	夏季(7-9月) 5.63 中間季 5.03 冬季(12-4月)3.00	4.5kW 蓄熱 24kWh	82 万円
家庭用コージェネレーション (SOFC)	発電 0.41 熱回収 0.36 電主運転(毎時電力需要の 9 割で運転)	電力 0.7kW 熱 0.61kW 蓄熱 6kWh (約 100L)	100 万円

ガス給湯器・潜熱回収型ガス給湯器・ヒートポンプ式給湯器・家庭用コージェネレーションの効率・容量は[81]、ガス給湯器・潜熱回収型ガス給湯器・ヒートポンプ式給湯器の価格は[82]、家庭用コージェネレーションの価格は想定 (2015 年の価格目標は 70~80 万円) [83]。

表 2-20 エネルギー料金の想定

料金単位：円	従来システム、高効率ガス給湯器	オール電化システム	コジェネレーションシステム
電力 x: 時間帯別消費量 [kWh/h] y: 年最大負荷 [kWh/h]	基本料金：273y 従量料金： $18.89 \times \text{Min}(120, x) + 25.19 \times \text{Max}(0, \text{Min}(x-120, 180)) + 29.1 \times \text{Max}(0, x-180)$	基本料金： $y \leq 6$ 1260 $6 < y$ $2100 + 273 \times \text{Max}(0, y-10)$ 従量料金 23～6時：11.82x 11～16時：夏季 37.56x、夏季以外 30.77x その他：25.2x	従来と同じ
ガス x: 月消費量 [m <sup>3</sup> ]	$x \leq 20$ $724.5 + 161.17x$ $20 < x \leq 80$ または冬季以外で $x > 20$ $997.5 + 147.52x$ 冬季のみ $x > 80$ $1165.5 + 145.42x$	—	$x \leq 20$ $724.5 + 161.17x$ $20 < x \leq 80$ または冬季以外で $x > 20$ $1837.5 + 121.27x$ 冬季のみ $x > 80$ $1837.5 + 121.27x$

電力：従来・コジェネは東京電力の「従量電灯 B」、オール電化は東京電力の「電化上手」、ガス：従来は東京ガスの一般契約料金、コジェネは東京ガスの家庭用選択約款（家庭用燃料電池契約）を参考に設定。

初期時点での世帯類型別の給湯需要を示す。平均して子供数が増加する若年夫婦・若年 2 世代においては初期時点から給湯需要が増加するが、その他の世帯類型では横ばいから減少の傾向を示す。

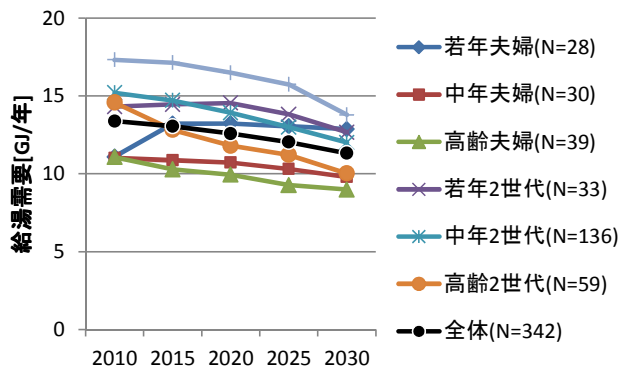


図 2-38 初期時点の世帯類型別の給湯需要の推移

### (3) 給湯システムの経済性の変化

例えば初期時点の世帯類型が「若年夫婦」であるとき、各年までの推移、すなわちインシヤルコスト増分から累積の光熱費削減を減じた額の推移を、図 2-39 に示す。初期時点での需要をもとに光熱費削減額を算出した場合と、長期的な需要変化を含めて光熱費削減額を算出した場合を示している。

長期的な需要変化を考慮すると、オール電化システムとコジェネシステムの収支の逆転は 3 年ほど前倒しになる。初期時点の需要ではオール電化システム・コジェネレーションシステムの収支は 15 年では潜熱回収型ガス給湯器に劣るが、その後の需要増加を見込むと 15 年でこれらシステムの収支はほぼ拮抗するようになる。

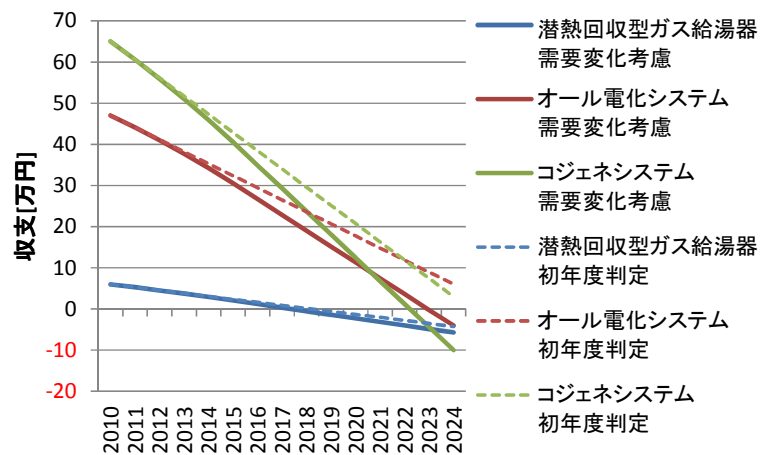
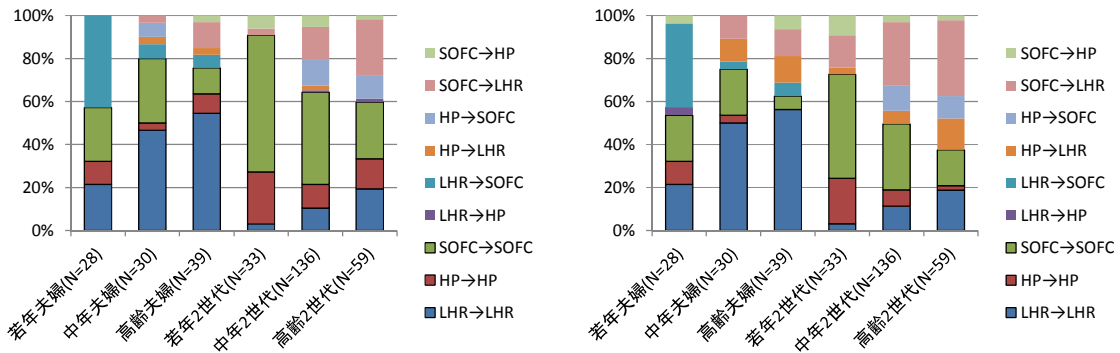


図 2-39 初期時点「若年夫婦」における給湯システム導入の総収支の変化

初期時点の世帯類型別に、給湯システムとして、潜熱回収型ガス給湯器(LHR)、オール電化システム(HP)、コジェネシステム(SOFC)のいずれが最も経済的となるかを初期時点の需要、10年後の需要、20年後の需要に対して判断し、その変化を図 2-40 に示した。経済性の判断においては、システムのインシヤルコストは寿命想定である 15 年で割ったものを光熱費に加算して比較した。

10 年間では 2~4 割、20 年間では 4~5 割にあたる世帯で、経済性の点で最適なシステムが変化している。例えば需要の減少する高齢夫婦・高齢 2 世代世帯では、初期時点の需要では大きな光熱費削減効果の得られるオール電化システムやコジェネレーションシステムが最適であっても、需要減少後はインシヤル負担の小さい潜熱回収型ガス給湯器が最も経済的であるといった場合がある。逆に子供の増加により需要の増加する若年夫婦世帯では、初期時点では潜熱回収型ガス給湯器が経済的であっても、後にコジェネレーションシステムが最適になるといった変化が生じる。



初期時点→10年後の変化

初期時点→20年後の変化

図 2-40 初期時点の世帯類型別の最適給湯システム

LHR: 潜熱回収型ガス給湯器、HP: オール電化システム、SOFC: コージェネレーションシステム (SOFC) 黒枠で囲っているところは、最適給湯システムが変化しなかったもの。

家庭での投資におけるひとつの判断基準が、機器寿命内での総収支である。図 2-41 には、初期時点の世帯類型別に、各給湯システム導入による 15 年間での収支の平均額を示す。それぞれ、初年度の光熱費削減額で判定したもの、15 年間の需要変化を考慮したものを示している。オール電化システムやコージェネレーションシステムは、光熱費削減効果が大い分、需要の変化に伴って光熱費削減額に増減のリスクがある。

初年度の判定よりも収支の悪化幅が大きいのは、需要が減少していく高齢夫婦、高齢 2 世代のオール電化システムの導入・コージェネレーションシステムの導入である。特にオール電化システムは昼間の在宅時間が長くなることによる影響も生じる。初年度の判定よりも収支の改善幅が大きいのは、給湯需要の増加する若年夫婦におけるオール電化システムの導入、コージェネレーションシステムの導入である。

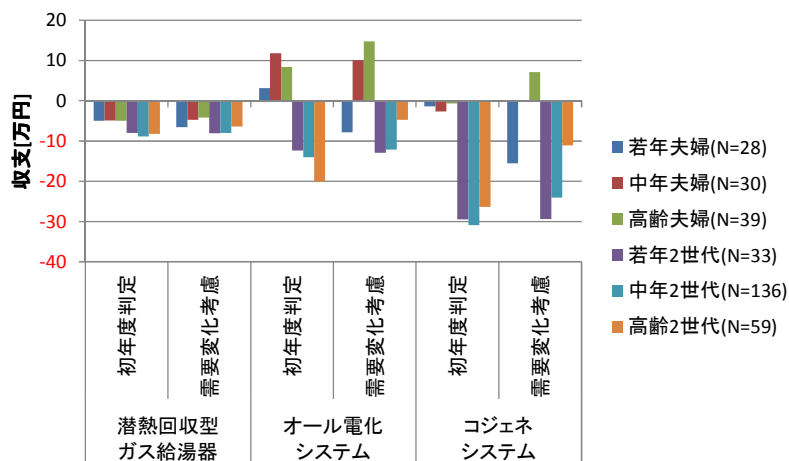


図 2-41 初期時点の世帯類型別の給湯システムごとの 15 年間の収支平均

また、省エネ投資の初期負担を融資し光熱費削減分で弁済させるといった施策スキーム（グリーンディール）が、英国において導入されている[84]。初年度支払額は初年度の光熱費削減額以内とする（2年目以降は定額もしくは年率2%で増加）と、光熱費支払とまとめた支払方法とするという特徴のあるローンを提供することで、家庭にとっては初期費用なし、かつ光熱費を増加させずに新しい機器を導入することが可能となる。しかし、将来の光熱費削減が減少するのならば家庭にとって後者のメリットが損なわれ、また将来の光熱費削減が増加するのならば本来家庭にとって望ましい投資であるにも関わらず本スキームが適用できないことがある。

オール電化システムについて、初期時点の世帯類型別に、初期投資と15年間の光熱費削減により得られるIRR（内部収益率）が6%を上回る比率を、図2-42に示す。同図には、光熱費削減が初年度の値で一定であるとしたときの比率も示しており、これは本スキーム（光熱費支払額一定の場合）によるローン提供者が6%の利益を確保できる割合に相当する。概して需要の大きい2世代世帯において高い内部収益率を示す家庭が多い。中高齢の世帯では、初年度の判定では内部収益率6%以上を確保できているものの、需要変化を考慮すれば内部収益率は6%を下回る場合があり、これらの家庭が本スキームを適用するといずれ光熱費削減以上に支払いを行わなければならないことになる。

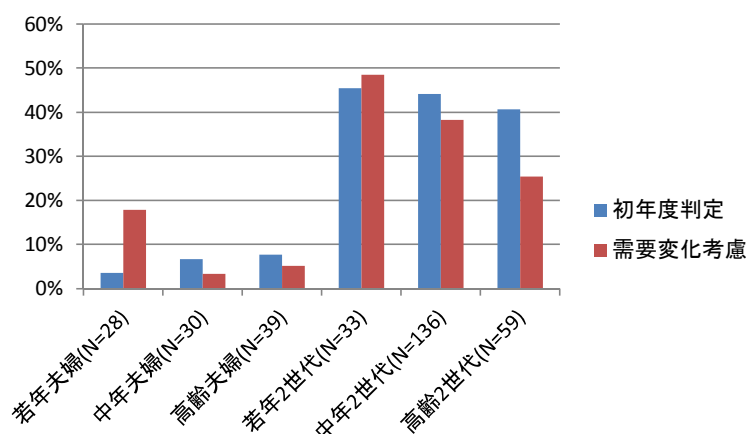


図 2-42 初期時点の世帯類型別の、オール電化システム導入の内部収益率が6%以上となる割合

#### (4) 二酸化炭素削減可能性の変化

二酸化炭素削減の観点からの最適システムの判断は、世帯の需要変化よりも、系統電力の排出係数の変化に強く依存した。表2-19に挙げた前提においては、ほぼすべての世帯において、系統電力の排出係数が0.37kgCO<sub>2</sub>/kWhを下回るのならばオール電化システムが、そうでなければコジェネレーションシステムが、より大きい二酸化炭素排出削減量をもつという結果であった。なお、都市ガスの二酸化炭素排出係数は0.0499kgCO<sub>2</sub>/MJとして計算している。

## (5) 結論

本項では、家庭の給湯システムについて、世帯構成の変化による給湯需要の変化を踏まえた上での経済性を中心とした選択基準の変化について分析を行った。

給湯需要の減少する高齢夫婦・高齢 2 世代世帯では、給湯システム導入時点では大きな光熱費削減効果の得られるオール電化システムやコジェネレーションシステムが最適であっても、需要減少後はイニシャル負担の小さい潜熱回収型ガス給湯器が最も経済的であるといった場合があった。逆に子供の増加により需要の増加する若年夫婦世帯では、給湯システム導入時点では潜熱回収型ガス給湯器が経済的であっても、後にコジェネレーションシステムが最適になるといった変化が生じる場合があった。

すなわち、初期時点の給湯システム選択判断において、その時点の需要の多寡のみを判断基準とすることには、長期には期待したほどの光熱費削減効果が得られなかったり、より光熱費削減効果が得られる機会を逃していたりする可能性がある。さらに、機器の更新時期が到来したとき、同じシステムで更新するよりも経済性に優れたシステムが存在する可能性がある。

給湯システムの選択においては、初期費用の高さや投資回収リスクの回避志向、省エネルギー機器に対する情報不足、既存給湯器や販売経路によるロックインなどが、省エネルギー型が普及する際のバリアとして指摘されている[85]。ここで指摘した経年による世帯構成の変化が給湯システムの経済性に与える影響は投資回収リスクのひとつであるが、その影響の程度について消費者への情報提供が必要である。

### 2.3.3. 本節のまとめ

本節では、前節で構築した地区のエネルギーサービス需要の長期的変化の推計モデルを用いて、世帯内の加齢に伴う人員構成変化による、住宅からの太陽光発電の余剰電力の発生、家庭用省エネルギー給湯システムの投資回収可能性への影響分析を行った。

住宅からの太陽光発電の余剰電力を吸収する需要として、昼間在宅時間の長い世帯では電気自動車、短い世帯では電気給湯器での利用との親和性が高いことを示した。また、省エネルギー給湯システムは、世帯構成の変化による給湯需要の変化を踏まえると、投資回収が 10 年を超えるようなシステムではシステムの初期選択時や更新時において、需要の長期変化を考慮すべきであることを示した。

## 参考文献

- [76] 浅野浩志, 「出力変動電源の系統連系技術」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 4, pp.297-300, 2012.
- [77] 八太啓行, 小林広武, 「ヒートポンプ式給湯器による太陽光発電余剰電力の有効活用方式—需要地系統大の翌日運用計画と効果—」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 4, pp.317-324, 2012.
- [78] 杉原英治, 畑遼太郎, 佐伯修, 舟木剛, 「ヒートポンプ式給湯器の昼間運転による太陽光発電逆潮流量の抑制効果に関する一考察」, 社会経済研究, No. 59, pp.15-23, 2011.5.
- [79] 小田拓也, 伊藤雅一, 川崎憲広, 宮崎隆彦, 柏木孝夫, 「交通センサス観測結果等を用いた乗用車の EV 充電負荷曲線と充電ポテンシャルの推定」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 12, pp.920-926, 2011.
- [80] 資源エネルギー庁, 「再生可能エネルギーの全量買取制度の導入に向けた検討について」, 再生可能エネルギーの全量買取に関するプロジェクトチーム (第 4 回) 資料, 2010 年 3 月 24 日
- [81] 樋口恭弘, 齋藤篤史, 千田二郎, 「住宅地型マイクログリッドの地域的な優位性の把握および予測モデルの構築 (運用段階における CO2 排出量の評価)」, 日本機械学会論文集(B 編), Vol. 78, No. 787, pp.53-57, 2012
- [82] 小宮山涼一, 柳美紀, 伊藤浩吉, 「給湯器との競合関係を考慮に入れた家庭用燃料電池の長期導入評価モデルの構築」, 第 21 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, 2005.1
- [83] 資源エネルギー庁 燃料電池推進室, 家庭用燃料電池について, 平成 26 年 2 月 3 日.
- [84] 英国政府“Green Deal: energy saving for your home or business”.  
Available: <https://www.gov.uk/green-deal-energy-saving-measures> (2013 年 2 月アクセス).
- [85] 元アンナ, 西尾健一郎, 岩船由美子, 「給湯器の保有実態と住宅市場セグメントによる違いの考察」, 電力中央研究所研究報告:Y10001, 2010

## 3. 地区のエネルギーシステムの分析

### 3.1. 建物配置を考慮したエネルギーシステムモデルの構築

前章では将来の人口減少・高齢化の進展による、住宅や地区のエネルギーサービス需要の変化をシミュレーションするモデルを構築し、住宅からの太陽光発電余剰発生や省エネルギー型給湯システムへの投資、地区における熱需要の分析を行った。一方、地区のエネルギー供給、特に熱利用を考える際には、建物の物理的な建物配置も考慮する必要がある。本節では、このような市街地地区の建物配置とエネルギーシステムの関係性を分析するために構築したモデルについて説明する。

#### 3.1.1. 本検討の目的

##### (1) 先行研究の状況

都市におけるエネルギーシステムの分析は、都市におけるエネルギー需給の関心の高まりに伴って 2000 年代後半から研究が盛んに行われるようになった[86] [87]。典型的な研究は、都市のエネルギーシステムの最適化型エネルギーモデルを構築し、その設備や運用パターンについて分析を行うものである[87]。一方で、地区内の建物配置、もしくは都市全体の構造とエネルギーサービス需要・最終エネルギー消費の関係は、1 で述べたように、先行研究で多数分析されているところであるが、供給側に着目した分析は少ない。

地区のエネルギーシステムを検討する際に重要な技術が、地域における熱電併給である。総合効率の高い技術である一方、熱は配送ロスが大きいために供給範囲が数キロメートル程度に限られること、大規模な導入でなければ初期費用の回収が困難であることから、需要の集中する都市に適している。このため、熱電併給の導入について、市街地を対象とした分析が行われている。

石川ら[88]は、熱電併給システムの導入によって実現する最適な市街地のありかたを明らかにしようとしている。ここでは東京都 23 区を対象に、特徴的な 1.5km 四方の地区のうち、年間熱負荷量が最大となる建物を熱電併給プラントの設置場所として、その周辺への熱供給による省エネルギー効果を試算している。また、Keirstead ら[89]は、英国の 1.6~6.4km 四方の地区を対象に、需要に応じて異なる規模の熱電併給プラントを組み合わせることがエネルギー効率を向上させることを示している。

しかしながら、熱需要（暖房、冷房、給湯）を高効率に供給できる技術は、必ずしも熱電併給のみではない。ヒートポンプ技術の開発により電力を用いても効率よく熱を供給できるようになった。一方で電力には、熱以外のエネルギーサービス需要を供給する能力もある。このように、熱電併給システムのみ、熱需要のみを対象とした分析では、その他に取り得る技術オプションを排除している可能性がある。そこで、本節では、市街地地区のエネルギー需給の評価を行うためのモデルを構築する。



## (2) 本検討の対象と特徴

家庭住宅と業務建物におけるエネルギー需要全体（暖房需要、冷房需要、給湯需要、動力需要に分類）を考慮対象とする。これに対して、建物別のエネルギー供給、熱電併給システムを用いた面的エネルギー供給に係る技術オプションの選択が、市街地の建物配置によりどのように変化するかを明らかにする。

市街地の物理的建物配置を、200メートルメッシュを縦・横に21並べた4.2 km 四方の区域（セル）で表現する。これらのセルが、本モデルにおける地理的解像度である。碁盤上の道路があると想定し、中心部より道路距離3km 以内の範囲にのみ建物が配置するとする。対象とする市街地の最大区域は図 3-1 に示す面積15.24km<sup>2</sup>(1524ha)の八角形状となる。対象とする時間スケールは60年間で、30年おきに3時点を抽出する。

4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8
3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6
3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8
4.0	3.8	3.6	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0

図 3-1 対象とする市街地の範囲と中心からの道路距離

数値は中心からの道路距離[km]を表す。

### 3.1.2. 建物配置の生成モデルの構築

#### (1) 概要

「建物配置生成モデル」は、与えられた居住人口と就労人口を収容可能な、土地利用と建物配置を生成するモデルである。具体的には、各セルに対して、土地利用方法として戸建住宅、集合住宅、事務所、店舗、交通ターミナル、非建物の比率を与えるものである。

類似の先行研究の状況を簡単に述べる。都市のモデル化は、都市施設の適正配置、交通路の設計、都市の人口分布といった課題を分析するための手法として都市解析の分野で研究が進んでいる[90]。コンパクトシティ化政策の評価等を目的として、実在の都市の配置を

初期状態として、シナリオ上で「BAU (Business As Usual)」「一極集中型」などの仮想的な将来配置を検討している例も多い[91][92]。セルオートマトンなどの手法を用いて建物配置を動的に生成する研究も存在する[93]。

ここで構築した建物配置生成モデルは、これらの基本的な考え方（例えば都市施設の配置は移動コストの総和を最小化として定式化するなど）を踏襲しつつ、地区内の建物配置やエネルギーシステムを考慮するにあたって必要な情報を出力できるものとしている。

モデルは最適化問題として定式化している。なお、これは「最適」な建物配置を生成することを意図していない。最適化は、制約条件を満たす多数の解のうちひとつを選択するための手段として用いている。

最適化問題における制約式は、建物床面積によって定まる居住可能量、就労可能量、店舗顧客収容量が、それぞれの需要を上回ることである。目的関数として、移動コスト、混雑コストからなる仮想的なコストを設定した。これらのコストには嗜好性を表すパラメータが含まれており、このパラメータを調整することによって、収容量に関する制約式を満たしたうえで、様々な建物配置を生成する。

## (2) モデルの対象

ここで定める土地利用は、に示す、戸建住宅、集合住宅、事業所、店舗、交通ターミナル、未利用の 6 種類であり、これらがエネルギーサービス需要に関連付けられる。建物配置生成モデルにおいては、事業所は 2 業種（例えば官庁と民間など）を区別し、店舗も日常利用用と非日常利用用を区別している。世帯は、世帯内就業者数・就業場所や戸建・集合への選好が異なるいくつかのグループに分類される。

地区内の居住者は戸建住宅か集合住宅に居住する。地区内居住の就業者はいずれかの事業所もしくは地区外で就業するが、地区内の事業所には地区外に居住する就業者も就業する。また居住者は日常的には地区内の店舗を利用する。非日常利用店舗には、地区外から利用者が訪れることがあり、また地区内居住者が地区外店舗を利用する場合もある。地区外との行き来の際には交通ターミナルを経由する。これらの行動により発生する移動のイメージを図 3-2 に示す。

表 3-1 土地利用の種類

戸建住宅	
集合住宅	
事業所	業種 1
	業種 2
店舗	日常利用
	非日常利用
交通ターミナル	
未利用	

業種 1・2 は特定の業種を想定していないが、事業所の種類や住民の職業を 2 通りに区別している。

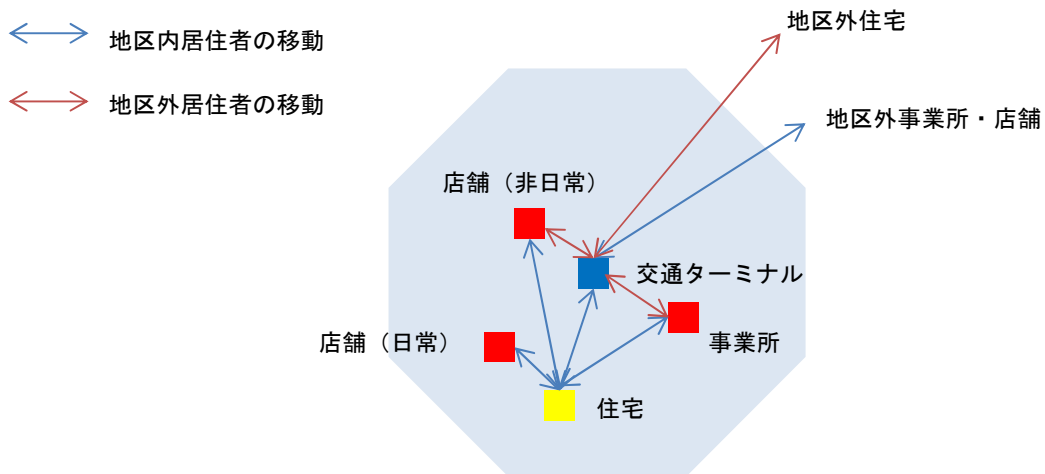


図 3-2 建物配置の生成において想定する移動

### (3) 定式化

建物配置生成モデルの定式化に用いる記号の説明を表 3-2 に示す。外生的に与えるパラメータは小文字、最適化計算により決定する変数を大文字で表記している。

表 3-2 建物配置生成モデルの定式化における記号の説明

記号	説明
添え字	
$x, y$	セルの縦横位置
$usg$	土地利用（戸建住宅、集合住宅、事業所、店舗、交通ターミナル、未利用）
$f$	世帯グループ
$o$	事業所種類（業種 1/業種 2）
$s$	店舗種類（日常利用/非日常利用）
パラメータ	
$cap_{usa}$	土地利用 $usg$ に対する単位面積あたり収容人数
$area$	セル面積
$numh_f$	世帯数
$wrkin_{f,o}$	世帯グループ $f$ の事業所 $o$ での世帯あたり就業者数
$numwrkfrom_o$	地区外居住の事業所 $o$ での就業者数
$srvin_{f,s}$	世帯グループ $f$ の店舗 $s$ の利用頻度
$numsrvfrom$	地区外居住の非日常利用店舗の利用者数
$wrkout_f$	世帯グループ $f$ の地区外での世帯あたり就業者数
$srvout_f$	世帯グループ $f$ の地区外店舗の利用頻度
$bldcst1_{usa}$	土地利用 $usg$ の建設コスト（1次の係数）
$bldcst2_{usa}$	土地利用 $usg$ の建設コスト（2次の係数）
$rsdpnl_{f,usa,r}$	
$d_{x,y,x',y'}$	セル $(x, y)$ とセル $(x', y')$ の間の距離
$d_{stn}$	交通ターミナルまでの距離上限
$d_{srv}$	日常利用店舗までの距離上限
$w_{bld}$	建設コストの加重
$w_{trv}$	移動コストの加重
$w_{cas}$	混雑ペナルティの加重
$w_{rsd}$	住宅選好ペナルティの加重
変数	
$USG_{x,y,usa,u}$	土地利用比率
$SUPRSD_{x,y,f,usa,r}$	住宅の収容可能世帯数（世帯グループ、戸建・集合別）
$SUPWRK_{x,y,o}$	事業所の収容可能就業者数
$SUPSRV_{x,y}$	店舗の収容可能利用者数
$SUPSTN_{x,y}$	交通ターミナルの収容可能人数
$SUPSTNTO_{x,y}$	交通ターミナルの収容可能人数（地区内居住者分）
$DMDWRK_{x,y,o}$	セル $(x, y)$ を起点とする事業所 $o$ での就業者数
$DMDWRKFROM_{x,y,o}$	セル $(x, y)$ を起点とする事業所 $o$ での就業者数（地区外居住者分）
$DMDSRV_{x,y,s}$	セル $(x, y)$ を起点とする店舗 $s$ の利用者数
$DMDSRVFROM_{x,y}$	セル $(x, y)$ を起点とする店舗 $s$ の利用者数（地区外居住者分）
$DMDSTNTO_{x,y}$	セル $(x, y)$ を起点とする交通ターミナルの利用者数(地区内居住者分)
$BLDCST$	土地利用に伴うコスト
$TRVCOST$	移動にかかるコスト
$CGSCOST$	混雑に関するペナルティ
$RSDCST$	戸建住宅・集合住宅の選択に関するペナルティ

## 1) 土地利用比率

それぞれの土地利用比率は、セル毎に合計すると1になる（式 3-1）。これに、住宅、事業所、店舗、交通ターミナルの単位面積あたり収容人数とセル面積を乗じたものが、各セルでの最大収容可能人数となる（式 3-2～3-5）。

$$\sum_{usg} USG_{x,y,usg} = 1 \quad 3-1$$

$$USG_{x,y,usgr} \times cap_{usgr} \times area \geq \sum_f SUPRSD_{x,y,f,usgr} \quad 3-2$$

$$USG_{x,y,usgw} \times cap_{usgw} \times area \geq \sum_o SUPWRK_{x,y,o} \quad 3-3$$

$$USG_{x,y,usgs} \times cap_{usgs} \times area \geq SUPSRV_{x,y} \quad 3-4$$

$$USG_{x,y,usgt} \times cap_{usgt} \times area \geq SUPSTN_{x,y} \quad 3-5$$

## 2) 人口収容にかかる条件

地区内の世帯数よりも、住宅の収容可能人数は大きくなければならない（3-6）。

$$\sum_{x,y,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} \geq numh_f \quad 3-6$$

地区内における就業者数総和よりも、地区内の事業所の収容可能人数総和が大きくなければならない（式 3-7）。ここで、後に就業者数の地区内移動距離を算出するために、就業者数はその移動の起点別に区別する。地区内居住者の場合はその居住地、地区外居住の場合は変数（後に交通ターミナル位置と関連付けられる）を起点とする（式 3-8、3-9）。

$$\sum_{x,y} SUPWRK_{x,y,o} \geq \sum_{x,y} DMDWRK_{x,y,o} \quad 3-7$$

$$DMDWRK_{x,y,o} = \sum_{f,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} \times wrkin_{f,o} + DMDWRKFROM_{x,y,o} \quad 3-8$$

$$\sum_{x,y} DMDWRKFROM_{x,y,o} = numwrkfrom_o \quad 3-9$$

非日常利用店舗については、地区内における店舗利用者数総和よりも、地区内の店舗の収容可能人数総和が大きくなければならない（式 3-10）。就業者と同様、非日常店舗利用者についてもその起点別に区別する（式 3-11、3-12）。

$$\sum_{x,y} SUPSRV_{x,y,s_2} \geq \sum_{x,y} DMDSRV_{x,y,s_2} \quad 3-10$$

$$DMDSRV_{x,y,s_2} = \sum_{f,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} \times srvin_{f,s_2} + DMDSRVFROM_{x,y} \quad 3-11$$

$$\sum_{x,y} DMDSRVFROM_{x,y} = numsrvfrom \quad 3-12$$

日常利用店舗については、全ての店舗利用者にとって、一定距離以内に十分な数の店舗が存在しなくてはならない（式 3-13）。逆に店舗が存続するために、全ての店舗について一定距離以内に十分な数の店舗利用者が存在しなくてはならない（式 3-14）。日常利用店舗の

利用者は地区内居住者のみであり、その起点別利用者数は居住者数によって定まる (3-15)。

$$\sum_{x,y,x',y' (d_{x,y,x',y'} < d_{stv})} SUPSRV_{x,y,s_1} \geq DMDSRV_{x,y,s_1} \quad 3-13$$

$$\sum_{x,y,x',y' (d_{x,y,x',y'} < d_{srv})} DMDSRV_{x,y,s_1} \geq SUPSRV_{x,y,s_1} \quad 3-14$$

$$DMDSRV_{x,y,s_1} = \sum_{f,usg_r} SUPRSD_{x,y,f,usg_r} \times srvin_{f,s_1} \quad 3-15$$

交通ターミナルを利用する全ての地区内居住者にとって、一定距離以内に十分な数の交通ターミナルが存在しなくてはならない (式 3-16)。交通ターミナルの起点者別利用者数は、居住者数によって定まる (式 3-17)。交通ターミナル利用者数は、地区内居住の利用者数に加え、地区外居住であるが地区内で就業したり地区内の非日常店舗を利用したりする人数の合計である (式 3-18)。

$$\sum_{x,y,x',y' (d_{x,y,x',y'} < d_{stn})} SUPSTNTO_{x,y} \geq DMDSTNTO_{x,y} \quad 3-16$$

$$DMDSTNTO_{x,y} = \sum_{f,usg_r} SUPRSD_{x,y,f,usg_r} \times wrkout_f + \sum_{f,usg_r} SUPRSD_{x,y,f,usg_r} \times srvout_f \quad 3-17$$

$$SUPSTN_{x,y} \geq DMDWRKFROM_{x,y} + DMDSRVFROM_{x,y} + SUPSTNTO_{x,y} \quad 3-18$$

以上の収容条件が、いずれの建物配置においても満たすべき基本的な制約条件である。

### 3) 建物配置の「コスト」

以降は、制約条件を満たす無数に存在する建物配置のなかから、あるパラメータに従って建物配置を一つ抽出する際の条件である。仮想的な「コスト」を定義し、そのコストが最小となる建物配置を抽出する。そのコストは、土地利用に伴うコスト、移動にかかるコスト、混雑に関するペナルティ、戸建住宅・集合住宅の選択に関するペナルティから成る。

土地利用に伴うコストの計算を式 3-19 に示す。基本的には第 1 項の比例部分のみを適用するが、交通ターミナルについてはスケールメリットを表現するため負の二次項を導入した。 $w_{bid}$  は本コストの重視度合いを表すパラメータである。

$$BLDCST = \left( \sum_{usg} USG_{x,y,usg} \times bldcst1_{usg} - USG_{x,y,usg}^2 \times bldcst2_{usg} \right) \times w_{bid} \quad 3-19$$

移動にかかるコストの計算を式 3-20 に示す。考慮しているのは、住宅から交通ターミナルへの移動、住宅（地区外居住の場合は交通ターミナル）から事業所への移動、住宅（地区外居住の場合は交通ターミナル）から店舗への移動である。各項では、起点別の人数に、着点までの距離とその選択比率（各セルの収容人数を収容人数合計で除したもの）を乗じている。

$$\begin{aligned}
TRVCST = & w_{trv} \times \\
& \sum_{\substack{x,y,x',y' \\ (d_{x,y,x',y'} < d_{stn})}} DMDSTN_{x,y} \times d_{x,y,x',y'} \times \frac{SUPSTN_{x',y'}}{\sum_{\substack{x,y,x',y' \\ (d_{x,y,x',y'} < d_{stn})}} SUPSTN_{x',y'}} \\
& + \sum_{x,y,x',y',o} DMDWRK_{x,y,o} \times d_{x,y,x',y'} \times \frac{SUPWRK_{x',y',o}}{\sum_{x,y,x',y',o} SUPWRK_{x',y',o}} \\
& + \sum_{\substack{x,y,x',y',s \\ (d_{x,y,x',y'} < d_{srv})}} DMDSRV_{x,y,s} \times d_{x,y,x',y'} \times \frac{SUPSRV_{x',y',s}}{\sum_{\substack{x,y,x',y',s \\ (d_{x,y,x',y'} < d_{srv})}} SUPSRV_{x',y',s}}
\end{aligned} \tag{3-20}$$

混雑に関するペナルティは、地区内に居住もしくは地区内で就労・店舗利用する人数が、地区の居住者に対する負の影響を表している。これを式 3-21 に示す。

$$\begin{aligned}
CGSCST = & \left\{ \sum_{x,y} \left( \sum_{f,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} + \sum_o SUPWRK_{x,y,o} + \sum_s SUPSRV_{x,y,s} \right) \times \right. \\
& \left. \sum_{f,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} \right\} \times w_{cgs}
\end{aligned} \tag{3-21}$$

最後に、戸建住宅・集合住宅の選好に関するペナルティを課す。

$$RSDCST = \left\{ \sum_{x,y} \left( \sum_{f,usgr} SUPRSD_{x,y,f,usgr} \times rsdpnl_{f,usgr} \right) \right\} \times w_{rsd} \tag{3-22}$$

これらの合計のコストが目的関数となる。

$$OBJECTIVE = BLDCST + TRVCST + CGSCST + RSDCST \tag{3-23}$$

#### (4) 計算手法

この非線形最適化モデルは、商用のモデリングシステムである Generic Algebraic Modeling System (GAMS) [94]を用いて定式化した。また商用の汎用ソルバーである Interior Point OPTimizer (IPOPT) [95]を用いて最適化計算を行った。非線形モデルであるため最適解の初期値依存が強く、初期値によっては局所解に陥る可能性がある。しかし本モデルにおける最適化計算は、冒頭に述べたとおり制約式を満たす建物配置を選択するものであり厳密な最適性を要求しないため、初期値が与える影響については考慮しなかった。

### 3.1.3. エネルギー需給の計算モデルの構築

#### (1) 概要

ここで構築した「地区内エネルギー需給モデル」は、与えられたエネルギーサービス需要に対して、最終消費、配送、転換、供給等に係る多数のエネルギー技術オプションの中から、合理的な選択を行うものである。

本モデルの先行研究との違いは次の2点である。まず、AIM-enduse [96]やMARKAL [97]

といった先行研究でも多数例のある最適化型エネルギーモデルと比較すると、対象を市街地に限定し、この中でのエネルギーキャリアの配送を明示的に扱っている点が特徴である。また、地域のエネルギーシステムを評価する先行研究[88][89]と比較すると、熱のみでなくエネルギーサービス需要全体を統合的に扱っている点が特徴である。

## (2) モデルの対象

### 1) 空間・時間範囲

本モデルの地理的なバウンダリは市街地である。このため、地区外からの電力や燃料の購入、地区内でのエネルギーキャリアの配送、地区内でのエネルギー転換、地区内での再生可能エネルギーの利用、地区内建物での最終消費機器の導入が含まれる。

対象とする時間スケールは 60 年間で、30 年おきに 3 時点を抽出する。

各時点を、エネルギー需要を代表する 5 季節（夏季最大、夏季、冬季最大、冬季、昼間季）から各 1 日の代表日を抽出する。また、夏季最大・冬季最大とエネルギー需要は同じであるが、太陽光発電等の自然エネルギーが利用できない条件を表す 2 季節（ピーク季節）を仮想的に追加し、これらの自然エネルギーが利用できない日においても十分代替できるエネルギー供給手段が導入されるようにする。

各季節代表日に対して、時間帯を 6 時間おきの 4 時間帯に分割し、これに加えて需要の 1 時間単位最大値を設定したピーク時間帯として設定する。

以上により、60 年間のエネルギー需給を、3 時点×7 季節×5 時間帯の合計 105 点で代表する。この季節・時間帯解像度は、計算機能力の制約下でエネルギー需要の季節・時間変動を鑑みたときに正当な評価を行うための最低限必要と考えられる区分である。

考慮するエネルギー需要は、住宅・建築物における熱需要（暖房・冷房・給湯）、電力需要、また移動需要である。移動需要については個人の移動（旅客輸送）のうち、自家用車によるもののみを対象とした。

### 2) エネルギー技術オプション

想定するエネルギーフローを図 3-3 に示す。地区外から購入するエネルギーとして、電力、ガス、液体燃料を想定している。また、太陽エネルギーも利用可能である。

地区内では、ガスをコジェネレーションにより電力と熱に転換することが可能である。

電力、ガス、熱が地区内におけるエネルギーキャリアであり、建物まで配送される。

エネルギーサービス需要として、動力、給湯、暖房、冷房、輸送（住民の自家用車による輸送のみ）を想定している。動力需要を供給するために、建物には、電力を直接受電するか、建物内コジェネレーションを導入するか、太陽光発電を設置するという選択肢がある。同様に、給湯需要を供給するために、ヒートポンプ式給湯システム、建物内コジェネレーション、ガス給湯システムの選択肢が、暖房需要を供給するためにはガス暖房機器、エアコン、地域熱の受け入れの選択肢が、冷房需要を供給するためにはエアコン、ガス冷



凍機、地域熱の受け入れ、輸送需要を供給するためには電気自動車、液体燃料自動車の選択肢を用意している。

なお、太陽光発電は、地区で共有されるものと建物単位で設置するものに分類してモデル化した。建物単位で設定されるものも、発電量に余剰が発生すれば逆潮流可能としている。

本研究では、人口減少・高齢化の進展による長期的なエネルギーシステムへの影響に着目するため、エネルギー技術ではあるが異なる時間軸・価値軸から評価されるべき自家発電・蓄電池等の導入についてはモデル評価の対象にしていない。建物の断熱強化、その他の工夫（自然採光利用等）によるエネルギーサービス需要自体の削減策を考慮していない。

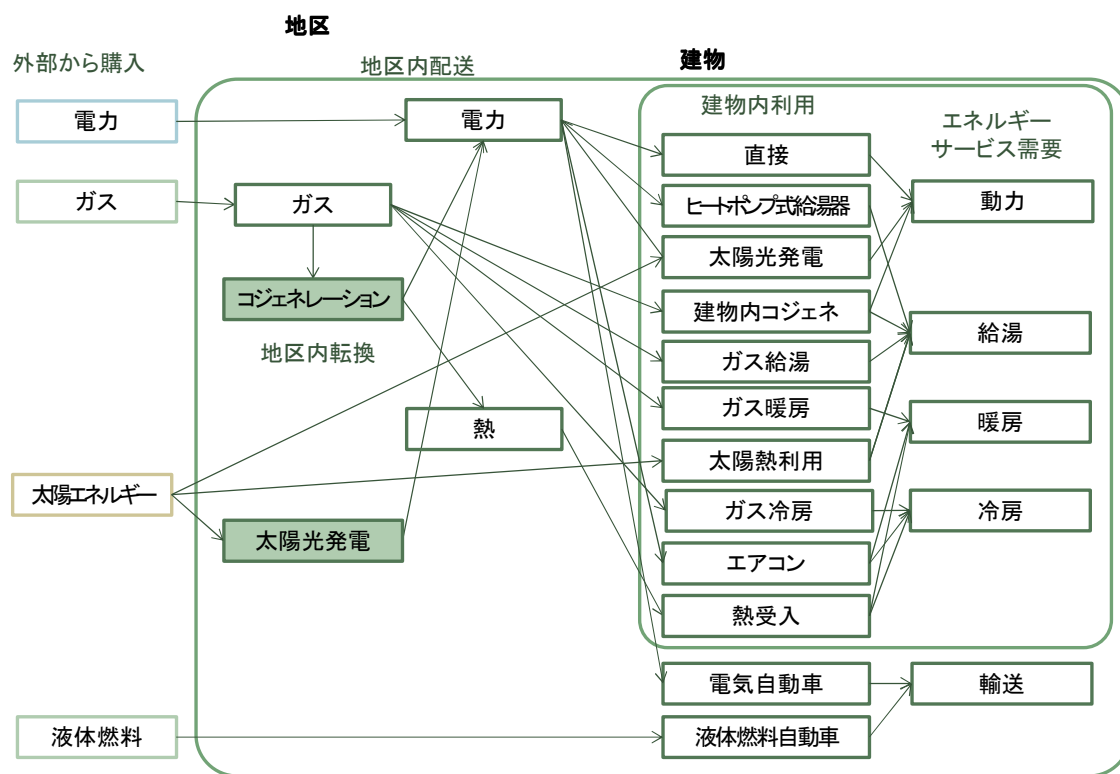


図 3-3 地区のエネルギー需給計算モデルにおけるエネルギーフロー

### 3) エネルギーシステムコスト

本モデルにおいてエネルギー技術オプションは、地区内のエネルギーシステムにおけるコストが最小となるように選択される。これは地区外に支払うエネルギー費用とエネルギー産業以外に支払うコスト、すなわち、地区外から購入する電力やガスの料金、地域エネルギー設備やエネルギー配送設備、建物内エネルギー利用設備の建設・設置に係るコストを考慮する。例えば地区内の住民が地区のエネルギー供給事業体に支払う料金は、地区内では相殺されるために考慮しない。

また、複数時点間のコストは、割引率 3%で現在価値換算を行った。これは地区のエネルギーシステム選択は公益事業であると見なし、ほぼ設備寿命内に投資回収が可能であれば投資することに対応している。一般の民間事業や消費者の投資判断におけるより高い内部収益率もしくはより短い投資回収年数の要求は考慮していない。

### (3) 定式化

「地区内エネルギー需給モデル」の定式化に用いられる記号の説明を表 3-3、表 3-4 に示す。また、具体的な式を以降に示す。

表 3-3 エネルギー需給計算モデルにおける記号の説明 (1)

記号	説明
添え字	
$hr, sn, yr$	時間帯、季節、時点
$n$	隣接セルの方向
$arg$	地区内エネルギー配送設備（配送されるエネルギーキャリア）の種類
$art$	地区内エネルギー転換設備の種類
$bdt$	建物内エネルギー利用設備の種類
$bdt_{fix} \subseteq bdt$	建物内エネルギー利用設備のうち、貯蔵機能のないもの
$bdt_{flx} \subseteq bdt$	建物内エネルギー利用設備のうち、貯蔵機能のあるもの
$gpe$	外部から購入可能なエネルギーの種類
$dmd$	エネルギーサービス需要の種類
$usg$	建物の種類
パラメータ	
$pe2arg_{gpe, arg}$	購入したエネルギーの種類と地区内エネルギー配送設備の対応を表すマトリクス
$dmd2arg_{dmd, arg}$	エネルギーサービス需要（動力）から地区内エネルギー配送設備（配電）への逆潮流の対応を表すマトリクス
$arg2art_{arg, art}$	地区内エネルギー配送設備への投入においてエネルギーキャリアとの対応を表すマトリクス
$art2arg_{art, arg}$	地区内エネルギー転換設備における各エネルギーキャリアへの転換効率を表すマトリクス
$arg2bdt_{arg, bdt}$	建物内エネルギー利用設備が利用するエネルギーキャリアの対応を表すマトリクス
$bdt2dmd_{bdt, dmd}$	建物内エネルギー利用設備におけるエネルギーサービス需要の供給効率を表すマトリクス
$demand_{x, y, usg, dmd, hr, sn, yr}$	エネルギーサービス需要
$dmd2rpf_{dmd}$	エネルギーサービス需要（動力）からの逆潮流効率
$rem_{*, yr', yr}$	時点 $yr'$ に導入された設備の時点 $yr$ における残存割合
$peprc_{gpe, hr, sn}$	外部からのエネルギー購入価格
$hrs_{hr}$	時間帯 $hr$ に対応する1日の時間数
$dys_{sn}$	季節 $sn$ に対応する1年間の日数
$yrs_{yr}$	時点 $yr$ に対応する年数
$aer_*$	設備コストの年経費率
$artcst_{a, art}$	地区内エネルギー転換設備の設備コストの容量に対する傾きと切片
$artcst_{b, art}$	
$argcst_{a, arg}$	地区内エネルギー配送設備の設備コストの容量に対する傾きと切片
$argcst_{b, arg}$	
$bdtcst_{bdt}$	建物内エネルギー設備の容量あたり単価
$peco2_{gpe}$	CO <sub>2</sub> 排出係数

表 3-4 エネルギー需給計算モデルにおける記号の説明 (2)

記号	説明
変数	
$ARG2BDTV_{x,y,arg,hr,sn,yr}$	各地区内エネルギー配送設備を通じて建物内エネルギー利用設備へ投入されたエネルギー量
$ARG2ARTV_{x,y,arg,hr,sn,yr}$	各地区内エネルギー配送設備を通じて地区内エネルギー転換設備へ投入されたエネルギー量
$ARGOUT_{x,y,n,arg,hr,sn,yr}$	地区内エネルギー配送設備によりセルから配送されたエネルギー量
$ARGIN_{x,y,n,arg,hr,sn,yr}$	地区内エネルギー配送設備によりセルへ配送されたエネルギー量
$ART2ARGV_{x,y,art,arg,hr,sn,yr}$	各地区内エネルギー転換設備から発生し地区内エネルギー配送設備へ供給されたエネルギー量
$GPEV_{x,y,gpe,hr,sn,yr}$	外部から購入されて地区内エネルギー配送設備に流入したエネルギー量
$BDRPF_{x,y,usg,hr,sn,yr}$	建物内エネルギー利用設備から地区内エネルギー配送設備に流入したエネルギー量 (逆潮流量)
$ARGLSS_{x,y,arg,hr,sn,yr}$	エネルギーロス
$ARTV_{x,y,art,hr,sn,yr}$	地区内エネルギー転換設備へのエネルギー投入量合計
$BDTV_{x,y,usg,bdt,hr,sn,yr}$	建物内エネルギー利用設備へのエネルギー投入量合計
$BDT2DMDV_{x,y,usg,bdt,hr,sn,yr}$	各建物内エネルギー利用設備から供給されたエネルギーサービス量
$ARTF_{x,y,art,yr}$	地区内エネルギー転換設備の容量
$ARGF_{x,y,art,yr}$	地区内エネルギー配送設備の容量
$BDTF_{x,y,usg,bdt,yr}$	建物内エネルギー利用設備の容量
$ARTNF_{x,y,art,yr}$	地区内エネルギー転換設備の新設容量
$ARGNF_{x,y,art,yr}$	地区内エネルギー配送設備の新設容量
$BDTNF_{x,y,usg,bdt,yr}$	建物内エネルギー利用設備の新設容量
$COSTTOTAL_{yr}$	トータルエネルギーコスト
$PRY_{yr}$	一次エネルギー供給
$CO2_{yr}$	CO <sub>2</sub> 排出量

### 1) エネルギーバランス

いずれのセルにおいてもエネルギー需給が一致する必要がある。セルにおけるエネルギー需要は、需要家が導入した建物内エネルギー利用設備に投入する総エネルギー量  $ARG2BDTV$  と、地域エネルギー転換設備 (地域熱供給等) に投入する総エネルギー量  $ARG2ARTV$  の合計である。セルに対するエネルギー供給は、隣接セルからの配送を通じたエネルギー授受  $ARGOUT$ ,  $ARGIN$ 、地域エネルギー転換設備が供給するエネルギー  $ART2ARGV$ 、当該セルに直接外部から供給されるエネルギー  $GPEV$ 、また建物内エネルギー利用設備が供給するエネルギー (太陽光発電等)  $BDRPF$  の合計である。なお、熱についてはエネルギーロス  $ARGLSS$  が発生する場合がある。この関係を式 3-24 に示す。

$$\begin{aligned}
 & ARG2BDTV_{x,y,arg,hr,sn,yr} + ARG2ARTV_{x,y,arg,hr,sn,yr} \\
 & = - \sum_n ARGOUT_{x,y,n,arg,hr,sn,yr} + \sum_n ARGIN_{x,y,n,arg,hr,sn,yr}
 \end{aligned}
 \tag{3-24}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{art} ART2ARGV_{x,y,art,arg,hr,sn,yr} \\
& + \sum_{gpe} GPEV_{x,y,gpe,hr,sn,yr} \times pe2arg_{gpe,arg} \\
& + \sum_{usg,dmd} BDRPF_{x,y,usg,dmd,hr,sn,yr} \times dmd2arg_{dmd,arg} \\
& - ARGLSS_{x,y,arg,hr,sn,yr}
\end{aligned}$$

地域エネルギー転換設備に投入する総エネルギー量 $ARG2ARTV$ は、セル内の各地域エネルギー転換設備の運転量 $ARTV$ （投入エネルギー量で測定）に、エネルギー種との対応係数 $arg2art$ を乗じたものの合計である（式 3-25）。また、セル内の各種地域エネルギー転換設備は、その運転量と転換効率 $art2arg$ に従って、転換後のエネルギー $ART2ARGV$ を供給する（式 3-26）。

$$ARG2ARTV_{x,y,arg,hr,sn,yr} = \sum_{artech} ARTV_{x,y,art,hr,sn,yr} \times arg2art_{arg,art} \quad 3-25$$

$$ARTV_{x,y,art,hr,sn,yr} \times art2arg_{art,arg} = ART2ARGV_{x,y,art,arg,hr,sn,yr} \quad 3-26$$

同様に、建物内エネルギー利用設備に投入する総エネルギー量 $ARG2BDTV$ は、セル内の各種建物内エネルギー利用設備の運転量 $BDTV$ （投入エネルギー量で測定）に、エネルギー種との対応係数 $arg2bdt$ を乗じたものの合計である（式 3-27）。

$$ARG2BDTV_{x,y,arg,hr,sn,yr} = \sum_{artech} BDTV_{x,y,usg,bdt,hr,sn,yr} \times arg2bdt_{arg,bdt} \quad 3-27$$

建物内エネルギー利用設備は、エネルギーの貯蔵機能がないもの、あるものに分類される。前者は、設備を運転するとそれと同時にエネルギーサービス需要を充足することができる設備であり、通常設備はこれに分類される。これらの設備では、時刻 $hr$ における設備の運転量 $BDTV$ が、同時に需要を充足するための運転 $BDT2DMDV$ として使用される（式 3-28）。後者は、設備にエネルギーを投入した時刻に関わらず、別の時刻におけるエネルギーサービス需要を充足することができる設備であり、例えば貯湯タンクを有するヒートポンプ式給湯器がこれに該当する。これらの設備では、設備の運転量 $BDTV$ の1日の合計と需要を充足するための運転 $BDT2DMDV$ の1日の合計が一致する（式 3-29）。

$$BDTV_{x,y,usg,bdt_{fix},arg,hr,sn,yr} = BDT2DMDV_{x,y,usg,bdt_{fix},hr,sn,yr} \quad 3-28$$

$$\sum_{hr} BDTV_{x,y,usg,bdt_{fix},hr,sn,yr} \times hrs_{hr} = \sum_{hr} BDT2DMDV_{x,y,usg,bdt_{fix},hr,sn,yr} \times hrs_{hr} \quad 3-29$$

いずれの建物内エネルギー利用設備においても、需要を充足するための運転量  $BDT2DMDV$  に効率  $bdt2dmd$  を乗じてエネルギーサービス需要に転換する。これが外生で与える建物内エネルギーサービス需要  $demand$  に対して過不足があってはならない。ただし例外として、建物内エネルギー利用設備の一種としている太陽光発電は、建物内の動力需要を満たした上で余剰があれば、余剰電力としての逆潮流  $BDRPF$  が可能であるとする（式 3-30）。

$$\begin{aligned} \sum_{bdttech} BDT2DMDV_{x,y,usg,bdt,hr,sn,yr} \times bdt2dmd_{bdt,dmd} \\ = demand_{x,y,usg,dmd,hr,sn,yr} + BDRPF_{x,y,usg,dmd,hr,sn,yr} \\ \times dmd2rpf_{dmd} \end{aligned} \quad 3-30$$

## 2) 設備とその運転

各時間断面でエネルギー需給バランスを満たすことに加えて、複数時点に渡って存在する設備についても考慮する。地域エネルギー設備の容量  $ARTF$ 、エネルギー配送設備の容量  $ARGF$ 、建物内エネルギー利用設備の容量  $BDTF$  は、それぞれの設備の運転量をも上回らなければならない（式 3-31～3-33）。

$$ARTF_{x,y,art,yr} \geq ARTV_{x,y,art,hr,sn,yr} \quad 3-31$$

$$ARGF_{x,y,art,yr} \geq ARGIN_{x,y,n,arg,hr,sn,yr} + ARGOUT_{x,y,n,arg,hr,sn,yr} \quad 3-32$$

$$BDTF_{x,y,usg,bdt,yr} \geq BDTV_{x,y,usg,bdt,hr,sn,yr} \quad 3-33$$

設備の種類ごとに設定した寿命に基づいて、設備の残存率  $rem$ （設備寿命に達するまでは1、その後は0）を設定する。新設量、各時点での新設量（地域エネルギー設備の新設量  $ARTNF$ 、エネルギー配送設備の新設量  $ARGNF$ 、建物内エネルギー利用設備の新設量  $BDTNF$ ）に乘以て合計することで算出する（式 3-34～3-36）。

$$ARTF_{x,y,art,yr} = \sum_{yr'} ARTNF_{x,y,art,yr'} \times rem_{art,yr',yr} \quad 3-34$$

$$ARGF_{x,y,arg,yr} = \sum_{yr'} ARGNF_{x,y,arg,yr'} \times rem_{arg,yr',yr} \quad 3-35$$

$$BDTF_{x,y,usg,bdt,yr} = \sum_{yr'} BDTNF_{x,y,usg,bdt,yr'} \times rem_{bdt,yr',yr} \quad 3-36$$

### 3) エネルギーシステムコスト

この地区内のエネルギーシステムにおけるコストは、地区外に支払うエネルギー費用と、エネルギー産業以外に支払うコストであるとする。すなわち、地区外から購入する電力やガスの料金、地域エネルギー設備やエネルギー配送設備、建物内エネルギー利用設備の建設・設置に係るコストを考慮する（式 3-37）。

地区外から購入するエネルギーの料金はエネルギー購入量に比例するとする。

設備コストは設備容量によって定めるが、スケールメリットが働くと考えられる地域エネルギー設備、エネルギー配送設備については、切片を持つ一次関数として表現した。容量がゼロの場合はコストゼロであるが、そうでない場合は傾き  $artcst_a, argcst_a$  に加えて切片項  $artcst_b, argcst_a$  を考慮する。これにより、本エネルギーモデルは混合整数計画となる。建物内エネルギー利用設備のコストは設備容量に比例とした。

設備コストは設備新設時点に計上している。計算期間中の終盤では、設備を導入するとコストは全額計上されるが運転は寿命中の一部の期間しか考慮されなくなってしまい、初期コストの高い設備の新設が避けられる計算結果となりがちである。計算終了時点を延ばすことにより、これによる不自然な計算結果を回避している。

$$\begin{aligned}
& COSTTOTAL_{yr} \\
& = \sum_{x,y,gpe,hr,sn} GPEV_{x,y,gpe,hr,sn,yr} \times peprc_{gpe,hr,sn} \times hrs_{hr} \times dys_{sn} \times yrs_{yr} \\
& + \sum_{x,y,art} \{ARTNF_{x,y,art,yr} \times artcst_{a_{art}} + ARTNF_{B_{x,y,art,yr}} \times artcst_{b_{art}}\} \\
& + \sum_{x,y,n,arg} \{ARGNF_{x,y,n,arg,yr} \times argcst_{a_{arg}} + ARGNF_{B_{x,y,n,arg,yr}} \times argcst_{b_{art}}\} \\
& + \sum_{x,y,usg,bdt} \{BDTNF_{x,y,usg,bdt,yr} \times bdtcst_{bdt}\} \\
& ARTNF_{B_{x,y,art,yr}} = \begin{cases} 1 & (ARTNF_{x,y,art,yr} > 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases} \\
& ARGNF_{B_{x,y,n,arg,yr}} = \begin{cases} 1 & (ARGNF_{x,y,n,arg,yr} > 0) \\ 0 & (otherwise) \end{cases}
\end{aligned} \tag{3-37}$$

一次エネルギー供給量、二酸化炭素排出量は、一次エネルギー換算係数や二酸化炭素排出係数をエネルギー消費量に乗じることで計算する（式 3-38、3-39）。

$$PRY_{yr} = \sum_{x,y,gpe,hr,sn} GPEV_{x,y,gpe,hr,sn,yr} \times hours_{hr,sn} \tag{3-38}$$

$$CO2_{yr} = \sum_{x,y,gpe,hr,sn} GPEV_{x,y,gpe,hr,sn,yr} \times hours_{hr,sn} \times peco2_{gpe} \tag{3-39}$$

#### (4) 計算手法

この混合整数計画モデルは、商用のモデリングシステムである Generic Algebraic Modeling System (GAMS) [94]を用いて定式化した。また商用の汎用ソルバーである Gurobi [98] を用いて最適化計算を行った。

本モデルは、長期を対象としていること、セル間のエネルギー配送を明示的に扱っていること、さらに一部に整数変数を含むことから、計算量の大きいモデルである。このため、表 3-5 に示すように 3 ステップに分けて計算を行い、徐々に解を絞り込むことにより計算時間を大幅に短縮している。外生的に与えるエネルギーサービス需要の分布度合いによるが、次節で示す建物配置（表 3-16）であれば、1 計算あたり 30 分～4 時間程度である。



ステップ2までは、ピーク季節（夏季最大・冬季最大とエネルギー需要は同じであるが、太陽光発電等の自然エネルギーが利用できない条件を表す2季節）・ピーク時間帯のみについて配送バランスの計算を行い、非線型のコスト関数を持つ地区内エネルギー転換設備と地区内エネルギー配送設備の設備容量を先に決定している。ただし、このピークのみに着目した計算方法の課題は、ヒートポンプ式給湯器など備蓄性を持つ技術の評価が過小もしくは過大になってしまう点がある。

表 3-5 エネルギー需給の近似計算方法

ステップ	最適化問題の種類	配送バランスの計算対象	解の絞り込み
1	線型計画	全時点、ピーク季節、ピーク時間帯	—
2	混合整数計画	各時点、ピーク季節、ピーク時間帯	地区内エネルギー転換設備と地区内エネルギー配送設備の取り得る位置はステップ1の結果で固定（容量は可変）
3	線型計画	全時点、全季節、全時間帯	地区内エネルギー転換設備と地区内エネルギー配送設備の取り得る位置はステップ2の結果で固定、容量はステップ2の結果で上限とする

### 3.1.4. 一連の計算手順

第 2 章で述べたエネルギーサービス需要の分析と併せて、地区のエネルギーサービス分析を行うための一連の手順を図 3-4 に示す。

業務部門については、第 2 章で推計されるゾーン毎のエネルギーサービス需要をいったん床面積あたり原単位に換算してから、建物配置生成モデルから生成される延床面積分布に乗じることによりエネルギーサービス需要の分布を推計した。家庭部門については、世帯単位（ミクロ）で人口・世帯動態モデルを適用し、世帯属性に合わせて建物配置内の住宅にランダムで割り付ける操作を加えることで、エネルギーサービス需要の分布を推計した。

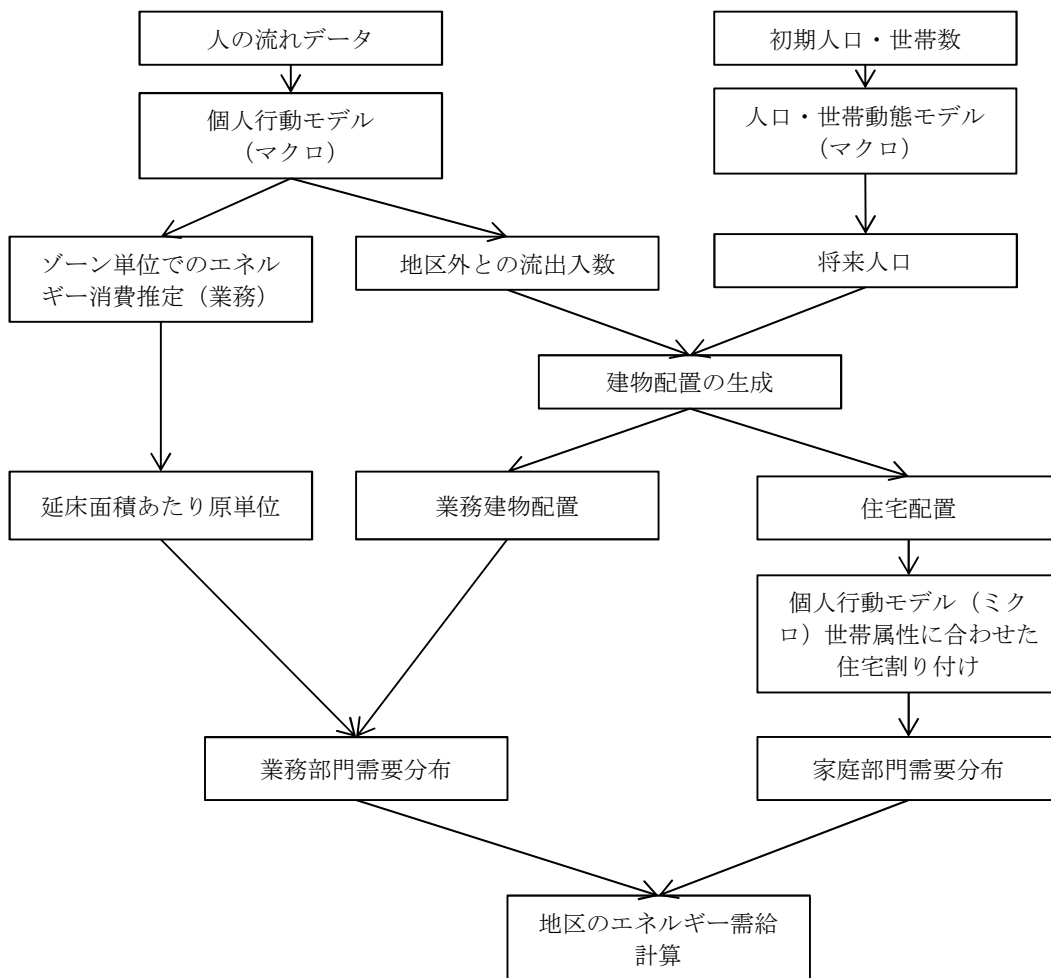


図 3-4 地区のエネルギー需給の一連の計算手順

### 3.1.5. 建物配置の指標化

#### (1) 指標の概要

建物配置を定量化するために、建物配置の指標を導入する。このような研究は、スプロール現象の定量化という文脈で行われてきた実績がある。よく用いられるのは市街地人口密度であり、日本では「DID（人口集中地区）<sup>6</sup>人口密度」として定められている。

しかし、人口密度だけが建物配置の形状を適切に示す指標ではない。Galster らによる研究[99]では、米国における都市のスプロールをテーマとして、都市の形状を 1) density（密度）、2) continuity（連続度）、3) concentration（集結度）、4) clustering（クラスタ度）、5) centrality（中心集中度）、6) nuclearity（核数）、7) mixed uses（土地利用の混合度）、8) proximity（土地利用の近接度）の 8 つの指標を提案している。

同文献におけるこの指標を用いたケーススタディの結果では一部は適正に機能しないことが判っており、また別の文献[21]でも、これらの指標は定性的な状況と矛盾することが指摘されている。また、同研究で対象としている都市のスプロールは、本検討で対象としている「市街地」よりもより広い範囲を扱っている。これらの不適合性もあるが、配置の指標を包括的に検討している事例であるという点から、これらの指標の考え方をを用いて建物配置を指標化することとした。本検討においてこれら指標を適用するに当たって、具体的な指標の計算方法において変更を行ったところがある。表 3-6 にその概要を示す。

これら 8 つの指標のうち、1) density から 6) nuclearity までは、建物の用途種別、もしくは全体に適用される指標である。7) mixed uses と 8) proximity は、異なる建物用途間の関係性を示す指標である。本検討への適用において、建物種別を「住宅」と「非住宅」に統合し、7) mixed uses と 8) proximity の指標はこれらの建物種別間の関係性に対して算出した。その他の指標は、住宅と非住宅を合わせた全体の建物配置に対して算出した。

---

<sup>6</sup> P19 の脚注 5 参照。

表 3-6 建物配置指標概要

指標	定義	単位または 取り得る値の種類
Density (人口密度)	地区全体での宅地面積あたりの換算人口	人/km <sup>2</sup>
Continuity (連続度)	一定以上の人口密度をもち、かつ地区中心から連続している街区の、地区全体の宅地面積に占める割合	無次元 0~1
Concentration (集結度)	街区単位の人口密度の標準偏差（正規化）。値が大きいほど、特定の街区に人口が集結していることを示す	無次元 正数(概ね1~2前後)
Clustering (クラスタ度)	街区単位の人口密度のクラスタごとでの標準偏差を計算し、平均をとって正規化した値の逆数。値が大きいほど、クラスタ単位で均質化された分布になっていることを示す	無次元 正数(概ね1前後)
Centrality (中心集中度)	街区ごとの人口を地区中心からの道路距離で重み付けした合計を正規化した値の逆数	無次元 正数(概ね1前後)
Nuclearity (核数)	地区内に形成されている人口集中箇所の数	無次元 整数
Mixed uses (土地の混合利用度)	街区単位で住宅の換算人口と非住宅の換算人口の積を正規化した値	無次元 正数
Proximity (土地利用の近接度)	街区単位で住宅の換算人口・非住宅の換算人口・距離の積の合計を正規化した値	無次元 正数

地区：モデルの対象である 4.2km 四方の範囲を指す。

宅地：住宅・非住宅建物が存在する土地を指す。

街区：モデルの最小空間単位である 0.2km 四方の範囲を指す。地区には 441 の街区が含まれる。

クラスタ：9 つの街区 (3x3) の集まりを指す。地区には 49 のクラスタが含まれる。

## (2) 指標の定式化

各建物配置の指標の意味するところと、具体的な計算方法を以下に示す。参照した文献 [99] の定義に準じているものもあれば、変形して適用したものもある。

建物配置をその収容人数（住宅であれば世帯人数、オフィスであれば就業者数、店舗であれば店舗利用者数）に換算し、表 3-7 に示す重みを乗じた上で合計した「換算人口」の分布  $N_{x,y}$  を用いて計算を行った。これは、エネルギーの使用にあたっては、居住人口のみでなくオフィスでの就業者数や店舗利用者数も影響することを考慮しており、表 3-7 の加重はそれぞれの土地利用における一人あたりのエネルギー消費量の大きかな比率を示している。

表 3-7 土地利用の種類別の人数加重

土地利用	加重
戸建住宅	1
集合住宅	1
事業所	0.1
店舗	0.05
交通ターミナル	0.0001

### 1) Density (人口密度)

人口密度は、地区全体をみたときの、宅地面積あたりの人口を表す指標である。ただし、分母となる面積は住宅や建物に使用されている宅地部分のみを考え、分子となる人口は、上述したように居住人口に加えて加重した従業者・店舗利用者数等を含めた換算人口として定義する(式 3-40)。なお、宅地面積あたりの居住人口密度は一般にネット人口密度と呼ばれる。居住人口や就業者数・店舗利用者数等が同じ場合、より宅地として使用される土地が狭いほど、密度は大きくなる。

$$DENS = \frac{\sum_{x,y} N_{x,y}}{BL}$$

$$BL = \sum_{x,y} \begin{cases} 1 & (N_{x,y} > 0) \\ 0 & (N_{x,y} = 0) \end{cases} \times area$$

3-40

$N_{x,y}$  : 換算人口

$BL$  : 宅地面積

$area$  : 街区面積 (ここでは 4ha)

### 2) Continuity (連続度)

連続度は、地区の中心から建物配置が連続を表す指標である。地区の中心を「中心連続街区」とした上で、以下の 2 条件を満たす街区 (ここでは 200m 四方) を再帰的に「中心連続街区」としてグループ化する。

1. 街区の人口密度が、地区全体の人口密度以上であること。ここでの人口密度は、1) と同様の宅地面積あたりの換算人口である。
2. 隣接セルが「中心連続街区」であること。

「中心連続街区」の面積の、地区全体の宅地面積に占める割合が「連続度」を表す(式 3-41)。

なお参照した文献[99]においては、連続度指標は、物理的な配置の連続性を考慮しておらず、上記の 1 に類する条件のみを設定している。

$$CONT = \frac{\sum_{x,y} CONTCELL_{x,y} \times area}{BL} \quad 3-41$$

CONSCELL : 「中心連続街区」であれば 1

### 3) Concentration (集結度)

集結度は、街区単位の人口密度のばらつきの大きさを表す指標である。街区単位の人口密度の標準偏差を、地区全体の人口密度で正規化した値として表される (式 3-42)。非宅地は考慮しない。同じ人口密度であっても、この指数が大きいほど、街区単位での人口密度のばらつきが大きい、すなわち特定の街区に人口が集結している配置であることになる。

$$CONC = \sqrt{\text{var}\left(\frac{N_{x,y}}{area}\right)} / DENS \quad 3-42$$

### 4) Clustering (クラスタ度)

クラスタ度は、地区内の建物配置が、クラスタ (小さい房) を形成しているかどうかを示す指標である。非宅地を除く街区の 9 つのまとまり (600m 四方) をクラスタの一単位とし、各クラスタ内での人口密度の標準偏差を算出し、その平均値を地区全体の人口密度で正規化し、さらに逆数をとった値として表される (式 3-43)。なお、このクラスタは、エネルギー需給計算モデルにおいて、エネルギー配管の工事を行う単位と一致している。この値が大きいほど、クラスタ単位で均質化された土地利用が為されている (クラスタを形成している) ことを示している。

$$CLUS = DENS / \text{mean}_m \left( \sqrt{\text{var}_{(x,y) \in M_m} \left( \frac{N_{x,y}}{area} \right)} \right) \quad 3-43$$

$m$ : クラスタを表す添え字

$M_m$ : クラスタ  $m$  に所属する街区の集合

### 5) Centrality (中心集中度)

中心集中度は、地区の中心にどれだけ人口が集まっているかを示す指標である。街区ごとの換算人口を地区中心からの道路距離で重み付けして合計し、地区に均一に換算人口が分布していた場合の値で正規化し、その逆数をとっている (式 3-44)。中心に人口が集まっているほど、この指標は大きな値を示す。

$$CENT = \frac{1}{3} BL \sum_{x,y} N_{x,y} / \sum_{x,y} N_{x,y} d_{x,y,x_c,y_c} \quad 3-44$$

$x_c, y_c$ : 地区中心

$d_{x,y,x',y'}$ : 街区 $(x,y)$ ,  $(x',y')$ 間の距離

## 6) Nuclearity (核数)

核数は、地区内に形成されている人口集中箇所（核）の数である。

以下の2条件を満たす街区を再帰的に「核」としてグループ化する。

1. 街区の人口密度が、地区全体の人口密度以上であること。ここでの人口密度は、1)と同様の宅地面積あたりの換算人口である。
2. 隣接セルが「核」であること。

この核の数が、本指標となる。2)で定義した中心連続街区は「核」のひとつである。

## 7) Mixed uses (土地の混合利用度)

土地の混合利用度は、住宅と非住宅の土地利用の混じり具合を示す指標である。街区単位で住宅の換算人口と非住宅の換算人口の積をとり、地区全体の住宅の換算人口と非住宅の換算人口の積で正規化している（式3-45）。土地利用が混合しているほど、この指標は大きな値をとる。

$$MXU = \frac{\sum_{x,y} (N_{r_{x,y}} \times N_{n_{x,y}})}{\sum_{x,y} N_{r_{x,y}} \times \sum_{x,y} N_{n_{x,y}}} \quad 3-45$$

$N_{r_{x,y}}$ : 換算人口（住宅）  
 $N_{n_{x,y}}$ : 換算人口（非住宅）

## 8) Proximity (土地利用の近接度)

土地利用の近接度は、住宅と非住宅の土地利用の混じり具合を、距離の概念を含めて示す指標である。なお、街区単位ではなく、4)で定義したクラスタ単位で判断する。任意の2クラスタについて、距離・住宅の換算人口・非住宅の換算人口の積をとって合計し、これを、距離の平均、地区全体の住宅の換算人口と非住宅の換算人口の積で正規化している（式3-46）。

$$PROX = \frac{\sum_{m_1} \sum_{m_2} d_{M_{m_1,m_2}} \times N_{r_{m_1}} \times N_{n_{m_2}}}{\text{mean}(d_{M_{m_1,m_2}}) \times \sum_{m_1} N_{r_{m_1}} \times \sum_{m_2} N_{n_{m_2}}} \quad 3-46$$

$d_{M_{m_1,m_2}}$ : クラスタ間距離  
 $N_{r_m} = \sum_{(x,y) \in M_m} N_{r_{x,y}}$ : クラスタ単位換算人口（住宅）  
 $N_{n_m} = \sum_{(x,y) \in M_m} N_{n_{x,y}}$ : クラスタ単位換算人口（非住宅）

### 3.1.6. 本節のまとめ

本節では、市街地地区のエネルギー需給の評価を行うためのモデルを構築した。市街地内の物理的建物配置が熱利用や配管敷設に与える影響を直接考慮できる特徴を備えた、地区内エネルギー需給モデルを構築した。

また、評価対象とする仮想的な建物配置を生成するための建物生成モデルを構築し、これらの建物配置を定量的に示すための建物配置の指標を導入した。



## 参考文献

- [86] S. Dhakal, “GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation,” *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 2, pp. 277–283, 2010.
- [87] J. Keirstead, M. Jennings, A. Sivakumar, “A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 3747–3866, 2012.
- [88] 石河正寛, 村木美貴, 菊地啓, 「エネルギー供給システムからみた最適市街地のあり方に関する研究—コージェネレーションに着目して—」, *日本都市計画学会都市計画論文集* Vol. 47, No. 3, 2012.10.
- [89] J. Keirstead, N. Samsatli, N. Shah, C. Weber, “The impact of CHP (combined heat and power) planning restrictions on the efficiency of urban energy systems,” *Energy*, Vol. 41, pp. 93–103, 2012.
- [90] 栗田治, 「都市モデル読本」, 共立出版株式会社, (2004).
- [91] 安立光陽, 鈴木勉, 谷口守, 「コンパクトシティ形成過程における都市構造リスクに関する予見」, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol. 68, No. 2, pp70-83, 2012.
- [92] 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, Mp. 1, pp7-37, 2010.
- [93] 奥野智江, 鈴木里珠, 狩野均, 加藤伸子, 「セルオートマトンと GA を用いた仮想都市の時系列的生成手法」, *人口知能学会論文誌*, AI-16, pp111-119, 2001.
- [94] GAMS Home Page. Available: <http://www.gams.com/>
- [95] IPOPT. Available: <http://www.coin-or.org/Ipopt/>
- [96] M. Kainuma, Y. Matsuoka, T. Morida, *Climate policy assessment: Asia-Pacific integrated modelling*, Springer, 2003
- [97] R Loulou, G. Goldstein, K. Noble, “Documentation for the MARKAL Family of Models,” *Energy Technology Analysis Programme*, 2004.
- [98] Gurobi. Available: <http://www.gurobi.com/>
- [99] G. Galster, R. Hanson, M. R. Ratcliffe, H. Wolman, S. Coleman, J. Freihage, “Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept,” *Housing Policy Debate*, Vol. 12, pp. 681–717, 2001.

### 3.2. モデルを用いた試算

前節で構築した地区のエネルギーシステムモデルをある地区に適用し、主要なパラメータを変化させることにより、モデルの挙動を確認した。

#### 3.2.1. 対象地区

計算対象としたのは、表 3-8 に示す人口をもつ地区 A である。千葉県郊外のある市街地をモデルとしており、市街地範囲は最大で 4.2km 四方としている。

初年度の人口と就労人口を外生として世帯構成とその将来を推計し、また個人行動モデルをもとに昼間の人口の移動についても推計した。地区内に初年度には 47 千人の人口を持ち、比較的若い世代が多い。就労人口 24 千人のうち約 3 分の 2 にあたる 16 千人は地区外で就業しているが、地区外居住の地区内での就業者も 11 千人存在する。30 年後には高齢化が進む。

表 3-8 対象地区 A の条件

		初年度	30 年後
人口		47,094	37,536
就労人口		23,728	14,211
世帯数	若中年単身	4,313	3,268
	高齢単身	153	4,520
	若中年夫婦	2,340	1,518
	高齢夫婦	1,127	2,473
	若中年二世帯等	5,733	4,712
	高齢二世帯等	1,949	1,342
昼間流出人口	就業以外	13,528	11,128
	就業	16,302	9,995
昼間流入人口	就業以外	11,225	9,433
	就業	14,174	8,840

#### 3.2.2. 建物配置の生成

建物配置生成モデルにおいて、異なる建物配置を生成するために変化させたパラメータは表 3-9 のとおりである。このうち、特に建物配置の生成に影響を与えるパラメータの挙動について述べる。

「交通ターミナル建設コスト」は、大きいほどのスケールメリットが大きいことを示している。このため、値が大きいときには中心に一つの交通ターミナル（鉄道駅などのイメージ）をもつ配置となり、小さいときには複数の交通ターミナル（バス停などのイメージ）をもつ配置となる。

制約により、交通ターミナルを中心に一定距離以内に住宅が配置される。移動コストの

加重が大きいほどより中心に集まりやすい。同様に、住宅から一定距離以内でサービス供給が行われる。逆に、混雑コストが大きければ、居住者同士、もしくは居住者と就業者・サービス利用者は離れる方向に動く。これらの結果として、建物配置が生成される。

一部のパラメータを変化させたときに生成される建物配置の違いを図 3-5 に示す。

表 3-9 建物配置生成モデルにおけるパラメータ

パラメータ		記号	値を変化させる幅	リファレンス
混雑	混雑ペナルティの加重	$w_{cgs}$	$0 \sim 2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$
住宅選好	住宅選好ペナルティの加重	$w_{rsd}$	-	0.1
移動	移動コストの加重	$w_{tvl}$	$0 \sim 0.2$	0.1
	日常利用店舗までの距離上限	$d_{srv}$	$0.5 \sim 1.5$	1
	交通ターミナルまでの距離上限	$d_{stn}$	$1 \sim 3$	2
建設	建設コストの加重	$w_{bld}$	-	10
	交通ターミナル建設コスト	$bldcst1_{usg}$ $bldcst2_{usg}$	$0 \sim 10^4$	$10^4$

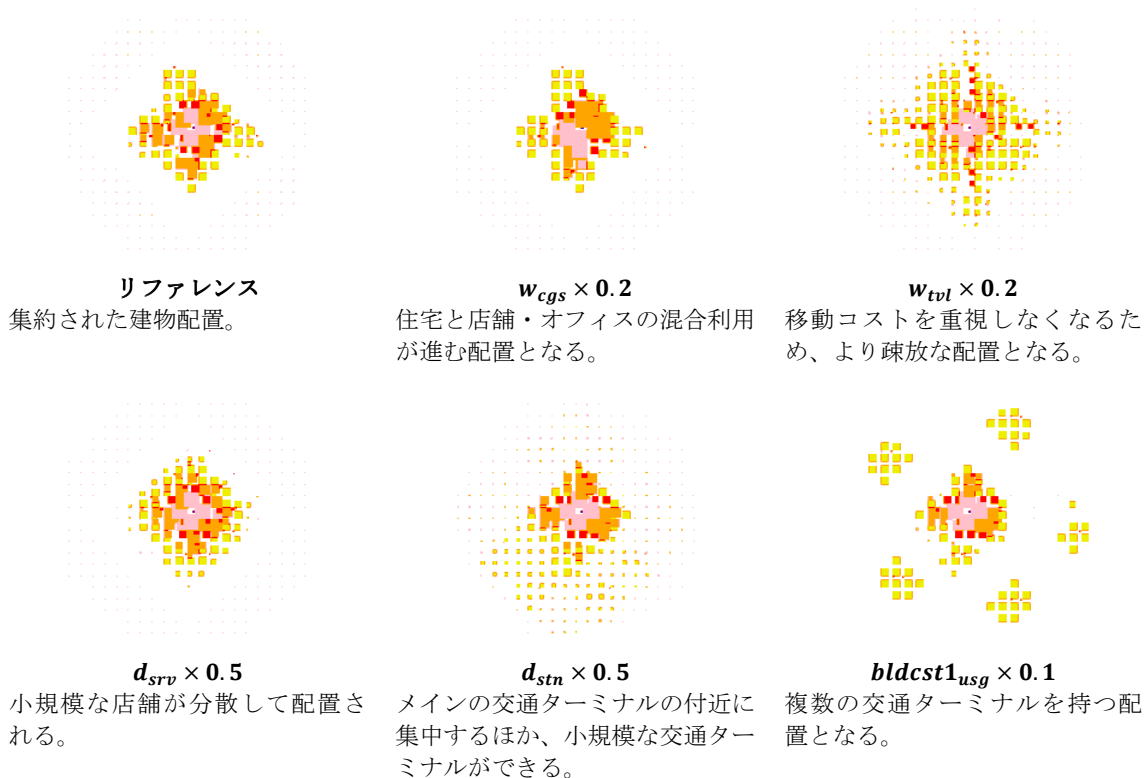


図 3-5 建物配置の例

凡例) 黄 : 戸建住宅、オレンジ : 集合住宅、赤 : 店舗、ピンク : オフィス

### 3.2.3. 地区内エネルギー需給モデルの挙動

#### (1) エネルギーサービス需要とエネルギー技術の前提

家庭部門のエネルギーサービス需要は、第 1 章で述べた需要推計モデルを用いて世帯ごとに推計した。なお、戸建住宅と集合住宅とでのエネルギーサービス需要の差は設けなかった。統計[63]では戸建住宅より集合住宅のほうが小さい世帯あたりエネルギーサービス需要をもつことが判っているが（表 3-10）、延床面積の差や共用部のエネルギー消費を含めた比較が為されていないためである。業務部門のエネルギーサービス需要は、第 1 章で述べた需要推計モデルから推計される延床面積あたり原単位を、生成した建物配置における延床面積に乗じて推計した。

エネルギー技術の設定に関する主要なパラメータは表 3-11 に示すとおりである。コージェネレーション、熱配管、ガス設備に関するパラメータは文献[100]に依っている。外部からのエネルギー購入は、地区中心の右下街区を始点に行われると仮定した。

さらに、ガス配管と熱配管の設備費は前述したように容量に対する一次式として表現しているが、この切片項の多くは土木工事費が占めることになる。既に指摘されているように、ガス配管と熱配管を同時整備することが設備負担を軽減する[101]。モデル上でもこれを表現するため、ガス配管と熱配管が共に整備されたときには、熱配管のみの切片項を計上することとした。

この設定において、コージェネレーションの燃料であるガスの価格は 1.5¥/MJ であり、発電効率 35%・熱利用効率 40%と設定しているため、コージェネレーション由来の電力の価格は熱利用分を差し引くと 2.57¥/MJ となり系統電力より安い。また、コージェネレーション由来の電力の二酸化炭素排出係数は熱利用分を差し引くと 0.307kgCO<sub>2</sub>/kWh となり、系統電力の二酸化炭素排出係数とほぼ同程度である。

表 3-10 統計における戸建・集合住宅の用途別エネルギー消費の差

	用途	延床面積	電力	熱	ガス	CO <sub>2</sub>	電力	熱	ガス	CO <sub>2</sub>
戸建	住宅	11,500	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100	1,100
	商業	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	公共	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	学校	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	公共施設	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
業務	住宅	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	商業	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	公共	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	学校	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
	公共施設	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
合計	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	

出所) [63]

表 3-11 エネルギー需給計算モデルにおける主要な変数

	項目	値
地区内エネルギー転換設備の効率	コジェネレーション	発電 35%, 熱 40%
建物内エネルギー利用設備の効率	ガス給湯器	90%
	ヒートポンプ式給湯器	4.5 (COP)
	建物内コジェネレーション	発電 35%, 熱 (給湯) 30%
	ガスヒーター	90%
	エアコン	冷房 3.5 暖房 4.5 (COP)
	ガス冷房	1.3 (COP)
エネルギー購入価格	電気	3.9 ¥/MJ (14.04 ¥/kWh)
	ガス	1.5 ¥/MJ
	液体燃料	2.9 ¥/MJ
地区内エネルギー転換設備のコスト	コジェネレーション	\$1,300,000 + 1,000\$/kW
地区内エネルギー配送のコスト[km あたり]	電気	132,800 + 1440 ¥/kW
	ガス	398,500 + 1200 ¥/(MJ/h)
	熱	797,000 + 4600 ¥/(MJ/h)
建物内エネルギー利用設備のコスト [¥/(出力 MJ/h)]	ガス給湯器	35,000
	ヒートポンプ式給湯器	110,000
	建物内コジェネレーション	175,000
	ガスヒーター	8,000
	エアコン	350,000
	ガス冷房	101,000
	熱受入	8,000 (暖房), 81,000 (冷房 (冷凍機コスト含む))
乗用車のコスト [1000¥]	液体燃料自動車	1000
	電気自動車	2500
CO <sub>2</sub> 排出係数	電気	0.3 kgCO <sub>2</sub> /kWh
	ガス	0.0136 kgC/MJ

## (2) エネルギーモデルの挙動 (ベースケース)

図 3-5 で示したうちの、比較的集約型の配置でもある「リファレンス」の建物配置に対し、表 3-11 のパラメータ設定によるものをベースケースとし、エネルギーモデルの挙動を確認した。

季節・時間帯毎のエネルギーサービス需要を、図 3-6 に示す。その内訳として、業務部門 (オフィス、店舗) の需要を図 3-7 に、家庭部門 (戸建住宅、集合住宅) の需要を図 3-8 に示す。業務部門と家庭部門のエネルギー消費は同程度である。移動需要には、住民の自家用車での移動分のみが含まれている。

エネルギーサービス需要の地理的分布は図 3-9 に示すとおりである。地区の中心部には

オフィスが集中し、需要密度が高く、また内訳としては動力需要と冷房需要が大きい。暖房需要は住宅の多い比較的周辺で点在して発生している。

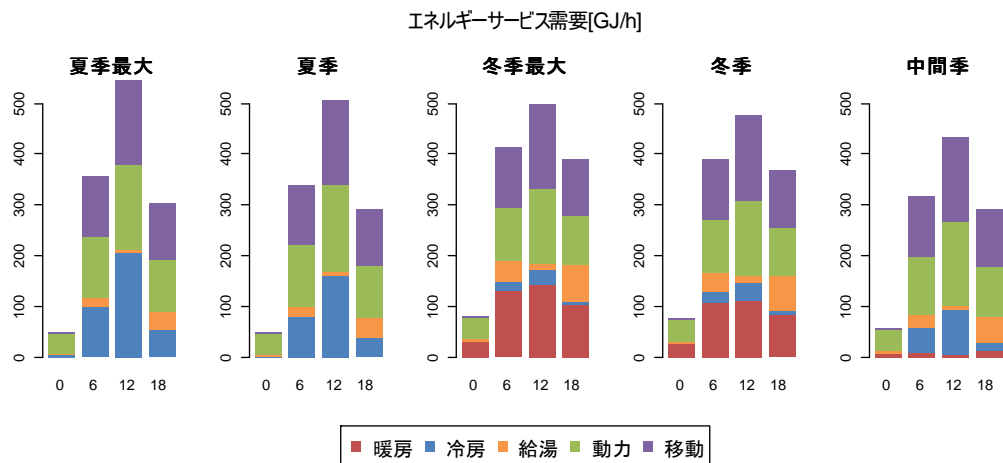


図 3-6 「リファレンス」の建物配置におけるエネルギーサービス需要

横軸の数値は時間帯（0～6時、6～12時、12～18時、18～24時）を表す。以下同じ。

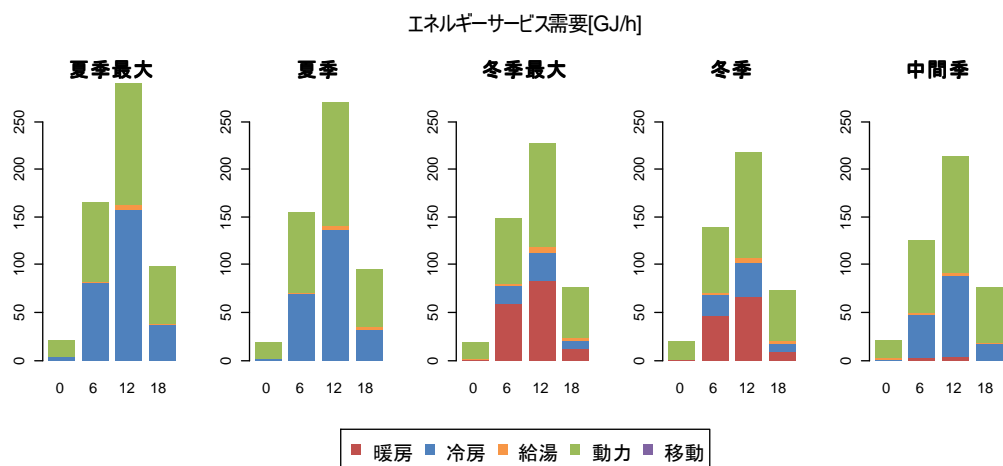


図 3-7 「リファレンス」の建物配置におけるエネルギーサービス需要（業務部門）

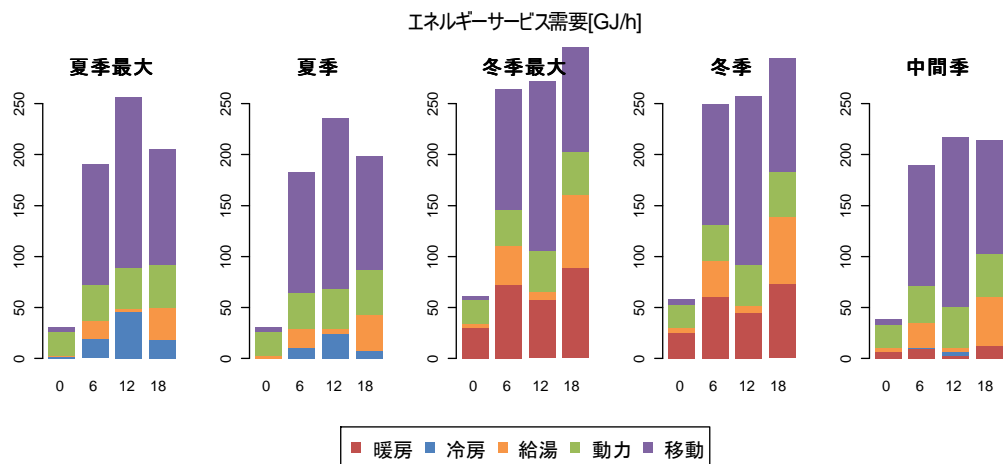


図 3-8 「リファレンス」の建物配置におけるエネルギーサービス需要（家庭部門）

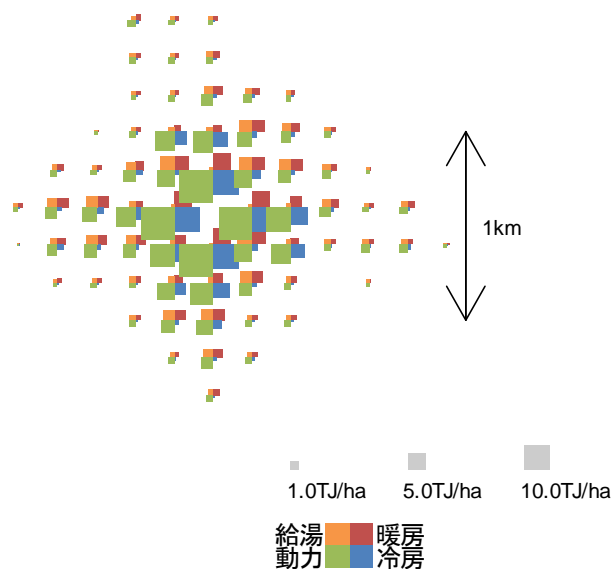


図 3-9 「リファレンス」の建物配置におけるエネルギーサービス需要発生密度

ベースケースにおけるエネルギー需給の計算結果を以下に示す。なお、特に言及がない場合は第一時点についての結果である。

エネルギー購入・受入量を図 3-10 に、最終エネルギー消費量を図 3-11 に示す。なお、ここには蓄積性のある自動車用液体燃料（移動需要に充足される）の購入・消費分を含めていない。また、建物配置に重ねて地区内エネルギー転換と地区内グリッドの配置を図示したものを、図 3-12 に示す。

ベースケースは集約された建物配置が実現されているためにコジェネレーションの導入

に適しており、地域外からはガスを購入して地域内で電力・熱に転換される比率が高い。需要の集中する中心部に複数のコジェネレーション設備が配置されている。

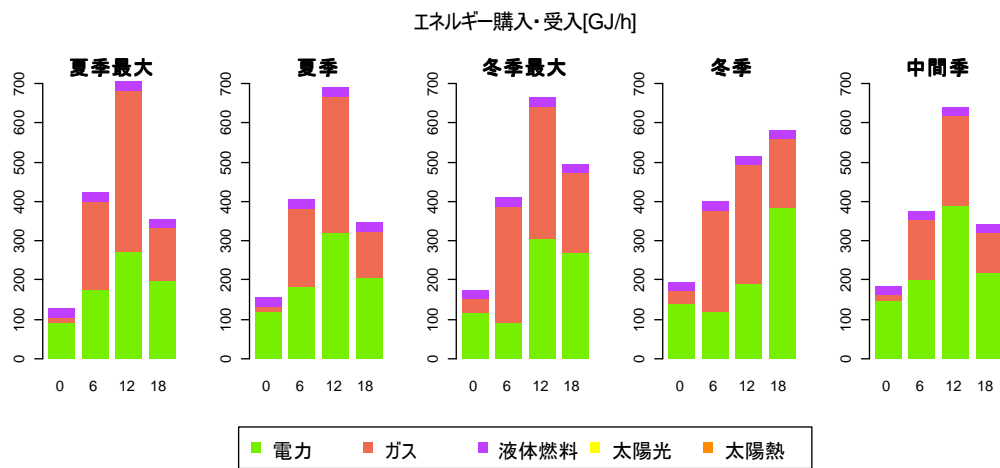


図 3-10 ベースケースにおけるエネルギー購入・受入量

エネルギー購入・受入量のグラフでは電力の一次換算は行っていない。以下同じ。

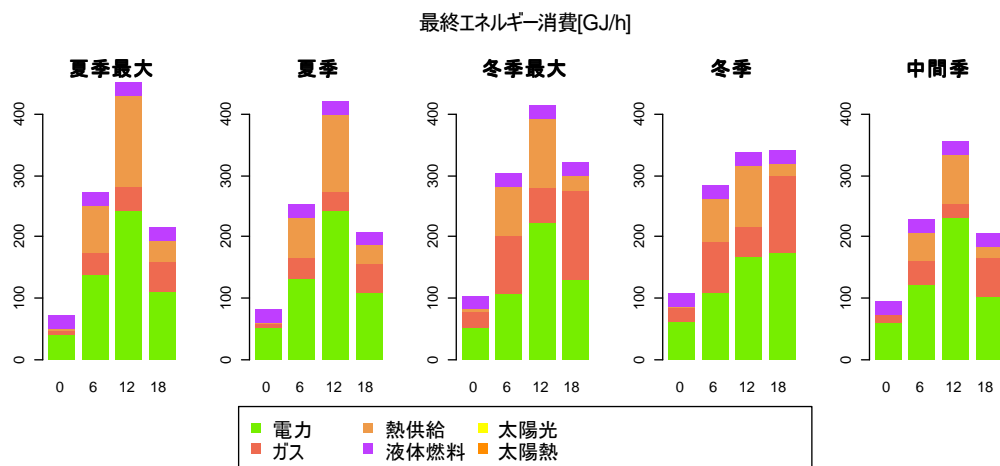
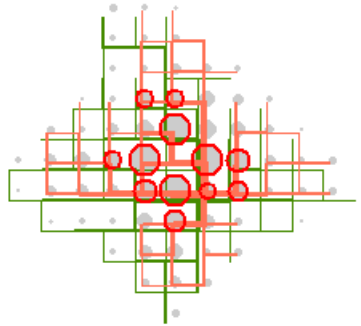


図 3-11 ベースケースにおける最終エネルギー消費量





— 配電      — ガス配管      — 熱配管  
○ コージェネレーション

図 3-12 ベースケースにおける地区内エネルギー転換と地区内グリッドの様子

各エネルギーサービス需要を充足するために利用されている各エネルギー利用機器へのエネルギー投入量を、図 3-15～図 3-16 に示す。なお、これらはエネルギー投入量で表現しており、機器の効率も考慮したエネルギーサービスベースでのエネルギー利用機器シェアは、これと異なる姿になる。

給湯ではガス給湯器におけるガスの利用が多いが、一部、小規模コージェネレーションやヒートポンプ式給湯器による供給も行われている。業務部門建物に加え、集合住宅では熱供給の利用が可能と想定しているため、全体としては冷暖房において熱供給による冷水・温水が使用される比率が高くなっている。

自動車は液体燃料自動車と電気自動車が導入されている。外部から購入する電気には時間帯別の料金の違いを考慮していないため、電気自動車の充電において深夜電力を利用するインセンティブは働いていない。

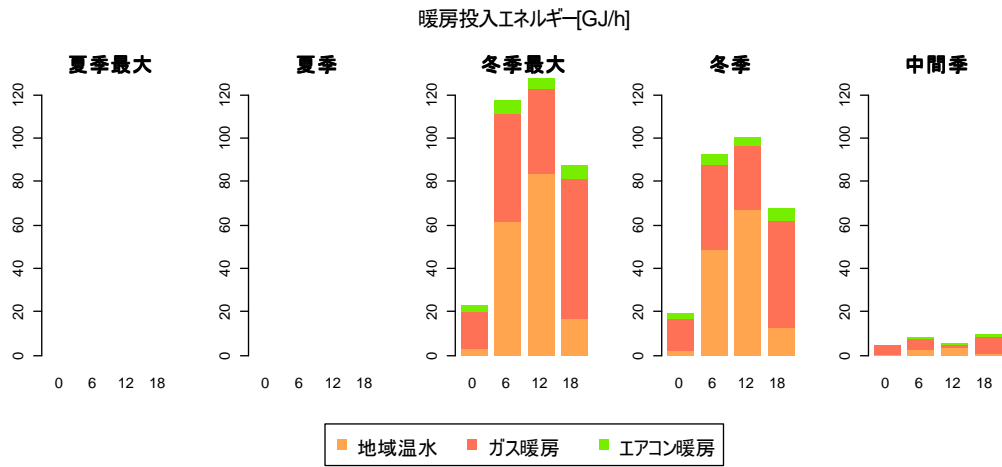


図 3-13 暖房のためのエネルギー利用

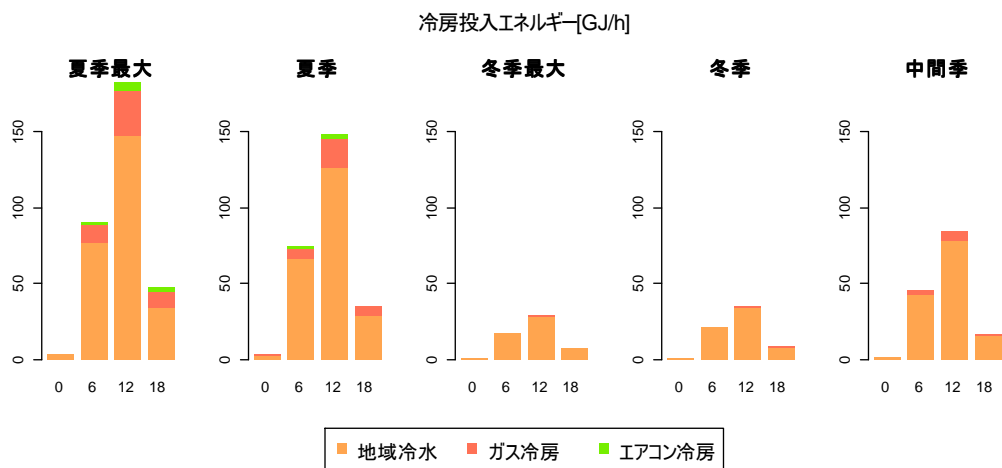


図 3-14 冷房のためのエネルギー利用

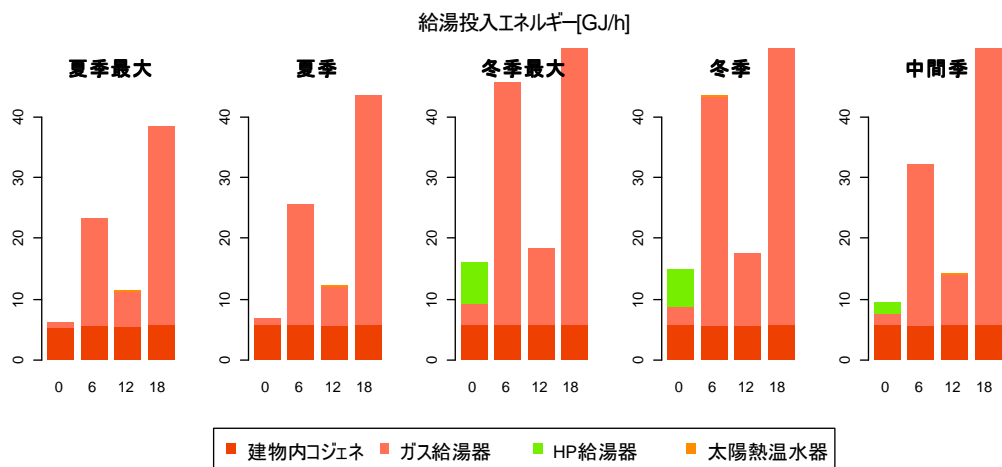


図 3-15 給湯のためのエネルギー利用

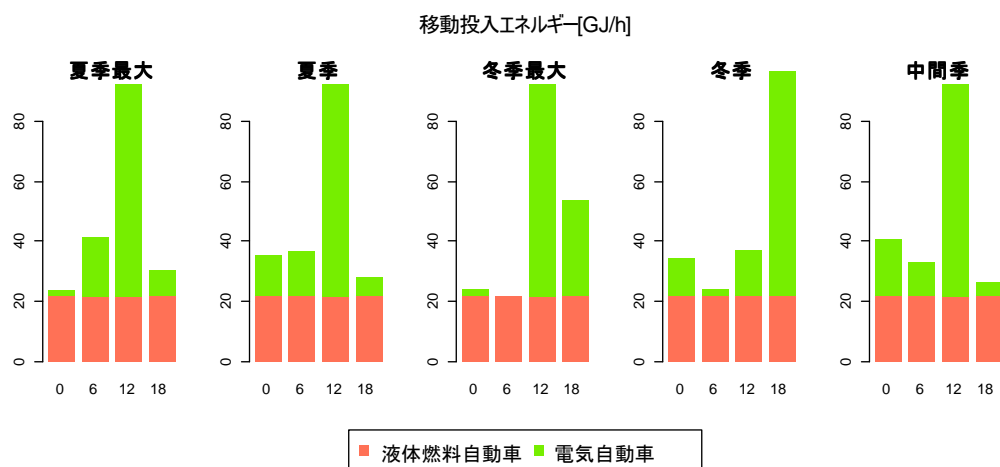


図 3-16 移動のためのエネルギー利用

### (3) エネルギーモデルの挙動（感度分析）

次に、熱供給の導入可能性に大きな影響を与えるパラメータを中心に感度分析を行い、ベースケースと合わせて比較を行った。用いたエネルギーサービス需要は図 3-6～図 3-9 に示したものと同一である。

感度分析で設定したケースは、表 3-12 に示した 1～6 の各ケースのとおりである。ケース 6 では季節時間帯別の電気料金を想定した。具体的な料金は、先行研究[102]における設定での料金比を用いて、表 3-13 のように想定した。

表 3-12 感度分析におけるケース設定の条件

		地区内エネルギー転換	配送設備コスト (電気・ガス・熱)	二酸化炭素排出ペナルティ [¥1000tCO <sub>2</sub> ]	系統電力排出係数 [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	電気料金
0	ベースケース	導入可	標準	0	0.3	季節時間帯別によらず一定
1	地域熱電併給不可	導入不可				
2	配送設備コスト 2 倍		2 倍			
3	二酸化炭素排出ペナルティ 1			5	0.4	
4	二酸化炭素排出ペナルティ 2			5	0.3	
5	二酸化炭素排出ペナルティ 3			5	0.2	
6	電気料金季節時間帯別					季節時間帯別

空欄はベースケースと同じ条件であることを示す。

表 3-13 電気料金の季節時間帯別価格の設定

季節	時間帯	価格比 (年間平均=1)	価格[¥/kWh]
夏季・夏季最大	昼間	1.619	22.7
その他	昼間	1.372	19.3
全季節	夜間	0.445	6.2
上記以外		1.122	15.8

ケース 0~5 のエネルギー購入・受入量、最終エネルギー消費量を図 3-17 に比較する。

ケース 1 は熱供給を含む地区内エネルギー転換が導入不可のケース、ケース 2 はガス・熱配送コストを 2 倍としたケースである。いずれの場合も、最終エネルギー消費としての電力量には変化がないが、その他の需要を電力で賄うか、ガスで賄うかに差が生じている。

ケース 3~5 は、¥5,000/tCO<sub>2</sub> に相当する二酸化炭素排出ペナルティを課したケースであり、外部から購入する電力の排出係数が 0.4~0.2kgCO<sub>2</sub>/kWh と異なっている。外部から購入する電力の排出係数が 0.4kgCO<sub>2</sub>/kWh と大きい場合、地区でのコージェネレーション利用がより有利になるため、ガスを購入して地区内での転換が行われるようになる。最終エネルギー消費の構成はほぼ変わらず、需要側での対策よりも地区内でのエネルギー転換の活用がより安価なことを示している。また、いずれのケースでも太陽光発電が一部利用されている。

また、ケース 6 では季節時間帯別の電気料金を導入した。これにより、図 3-18 に示すように、ベースケースの結果図 3-10 では季節時間帯によらず電力購入が行われていたものが、夜間における電力購入に偏るようになってきている。また技術別にみると安価な深夜電力を利用できるヒートポンプ給湯器や電気自動車が増加するため、これらの導入量が増加している。

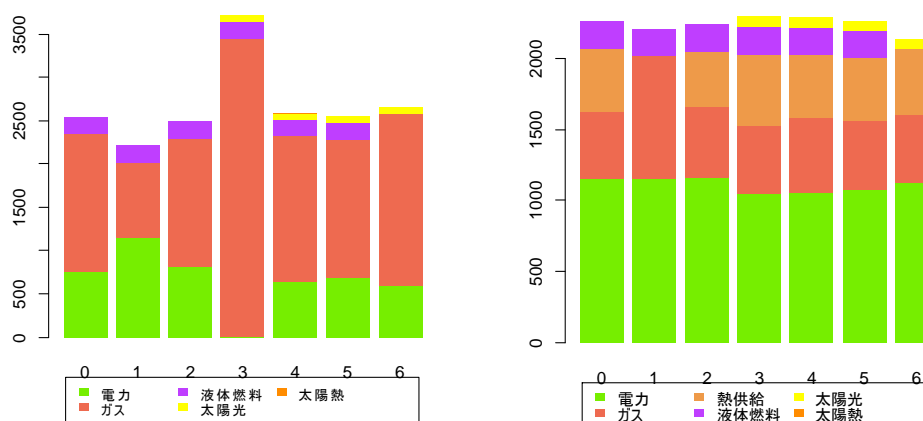


図 3-17 各感度分析ケースにおけるエネルギー購入・受入量(左)、  
最終エネルギー消費量(右) [TJ/year]

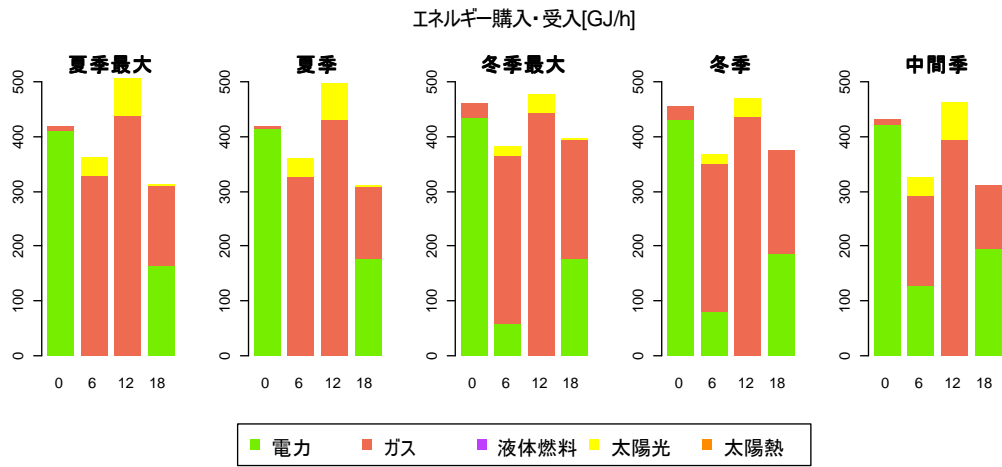


図 3-18 感度分析「電気料金季節時間帯別」ケースにおけるエネルギー購入・受入量

### 3.2.4. 本節のまとめ

構築した建物配置を考慮したエネルギーシステムモデルを用いた試算を行い、モデルが、エネルギー技術構成に関する定性的な理解に沿った挙動を行っていることを確認した。

### 3.3. 建物配置がエネルギーシステム選択に与える影響の分析

前節では市街地地区の建物配置とエネルギーシステムの関係性を分析するために建物配置生成モデルと地区内エネルギー需給モデルを構築した。本節では、このモデルを用いて、市街地地区の建物配置とエネルギーシステムの分析を行う。

#### 3.3.1. 建物配置とエネルギーシステムの選択

##### (1) 本検討の目的

地区を開発・再開発するときどのようなエネルギーシステムが望ましいか、もしくはどのような地区であれば二酸化炭素排出量削減が見込めるかについての目安があれば有益である。例えば、国土交通省「低炭素まちづくり実践ハンドブック」[24]では、熱需要密度が高ければ地域熱供給の導入可能性があり、その目安として町丁目単位で  $4.2\text{TJ/ha}\cdot\text{年}$  以上、もしくはグロス容積率（土地面積に占める建物床面積の割合）が  $100\%$  以上であること挙げられている。このような地点ごとの熱需要密度のほかにも、地区全体の建物配置という、より巨視的な点から、エネルギーシステムへ選択に対して有効な指標があるかどうかを探索した。

前項で構築したモデルを用いて、建物配置の違いによる最適エネルギーシステムの違いについて分析を行った。建物配置は、前述した建物配置指標を活用することで定量化を行うことで、エネルギーシステム選択との一般的な関係を抽出することを試みた。

##### (2) 前提条件

前項で分析したのと同じ地区 A（表 3-15）の条件について、建物配置生成モデルにより約 30 の建物配置を生成し、そのうち配置が過度に分散しているなどで規定時間内にエネルギー需給計算が終わらなかったものを除く、20 種類の配置を分析対象とした。

これらの 20 の建物配置に対応する、エネルギーサービス需要の分布を図 3-19 に示す。なお、エネルギーサービス需要の合計は、家庭のエネルギーサービス需要生成の際に乱数を用いていることから、需要に若干の差異が発生しており、分析の際これを考慮する必要がある。また、建物配置指標の平均・最大・最小・標準偏差を表 3-16 に示す。

表 3-14 に示す二種類のケースについて計算を行った。二酸化炭素排出に対するペナルティについては、ペナルティを課さない場合と、 $\text{¥}5,000/\text{tCO}_2$  を課す場合について計算を行った。系統電力排出係数は  $0.3\text{kgCO}_2/\text{kWh}$  とした。その他のエネルギー需給計算におけるパラメータ設定は、表 3-11 に掲げたものと同じとした。これらの結果をもとに、建物配置指標と選択されたエネルギーシステムの間関係を分析した。

また、異なる地区条件として、地区 B（表 3-15）を設定し、生成した配置のうち 23 種

類についてベースケースでのエネルギー需給計算を行った。地区 B は、初年度人口は地区 A と同規模に揃えているが、地区内に店舗やオフィスが少なく、差し引きの昼間人口が比較的少ない。これらの 23 の建物配置に対応する、エネルギーサービス需要の分布を図 3-20 に示す。これを、地区 A から得られた結果と比較することで、建物配置指標の有効性について検討を行った。

表 3-14 「建物配置の指標とエネルギーシステムの選択」分析におけるケース設定

		二酸化炭素排出 ペナルティ [¥1000/tCO <sub>2</sub> ]	系統電力排出係数 [kgCO <sub>2</sub> /kWh]
0	ベースケース	0	0.3
1	二酸化炭素排出ペナルティケース	5	0.3

表 3-15 対象地区 A, B の条件

		地区 A		地区 B	
		初年度	30 年後	初年度	30 年後
人口		47,094	37,536	47,094	41,494
就労人口		23,728	14,211	22,593	13,837
世帯数	若中年単身	4,313	3,268	4,126	2,806
	高齢単身	153	4,520	236	4,543
	若中年夫婦	2,340	1,518	1,957	1,485
	高齢夫婦	1,127	2,473	1,396	2,818
	若中年二世帯等	5,733	4,712	6,212	4,623
	高齢二世帯等	1,949	1,342	1,909	1,533
昼間流出 人口	就業以外	13,528	11,128	12,659	10,643
	就業	16,302	9,995	15,203	10,178
昼間流入 人口	就業以外	11,225	9,433	8,871	7,346
	就業	14,174	8,840	7,976	4,876

表 3-16 対象地区 A の建物配置指標の分布

	平均	最大	最小	標準偏差
人口密度	4,320	7,372	1,300	1,535
連続度	0.292	0.488	0.168	0.092
集結度	1.120	2.374	0.586	0.392
クラスタ度	2.506	4.522	1.281	0.801
中心集中度	1.246	1.718	0.885	0.211
核数	1.900	11.000	1.000	2.360
土地の混合利用度	2.478	5.000	0.593	1.597
土地利用の近接度	0.565	0.736	0.318	0.099

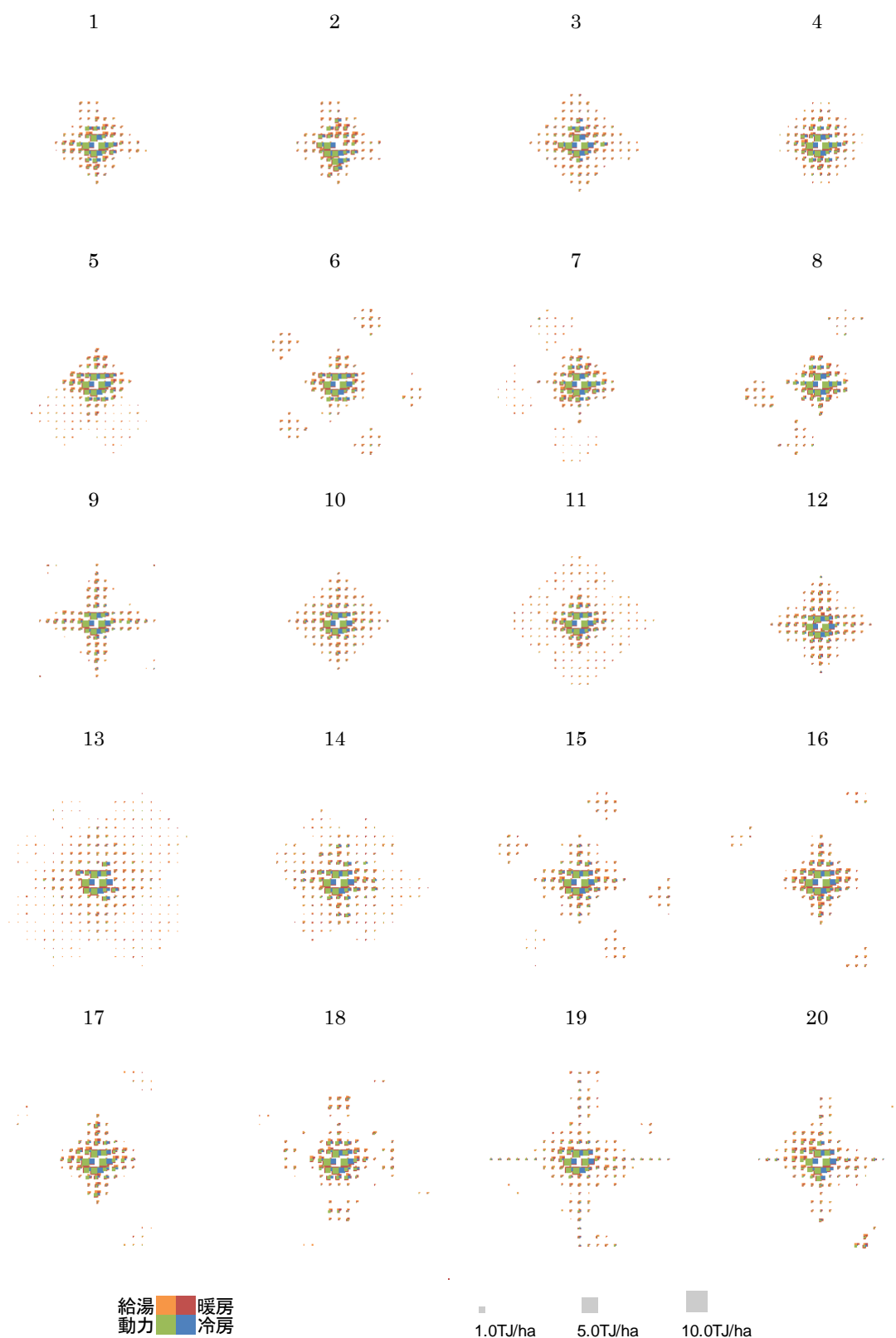


図 3-19 地区条件 A での 20 種類のエネルギーサービス需要発生分布



表 3-17 対象地区 B の建物配置指標の分布

	平均	最大	最小	標準偏差
人口密度	4,918	9,422	1,239	2,434
連続度	0.274	0.432	0.143	0.057
集結度	1.276	2.455	0.569	0.466
クラスタ度	2.184	3.610	0.439	0.594
中心集中度	1.287	1.821	0.781	0.271
核数	1.609	4.000	1.000	0.988
土地の混合利用度	3.940	8.046	1.579	1.739
土地利用の近接度	0.569	0.739	0.345	0.113

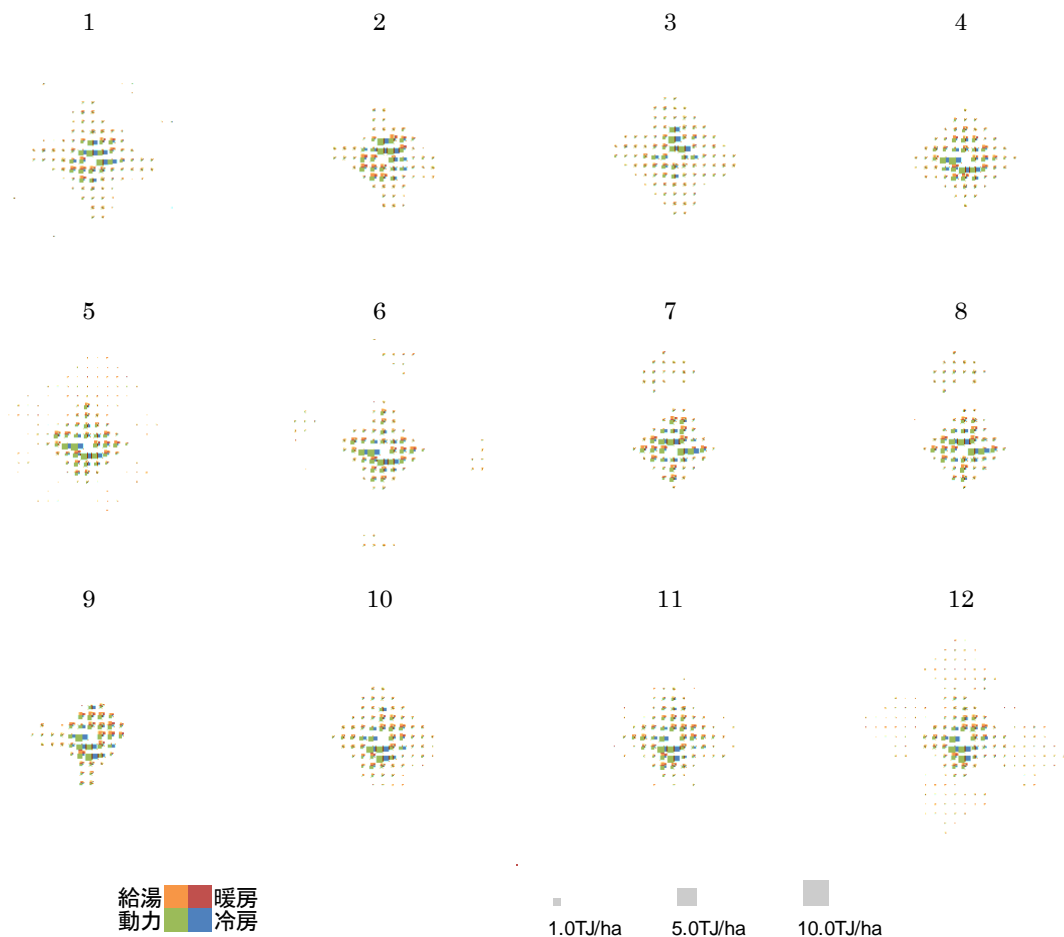


図 3-20 地区条件 B での 23 種類のエネルギーサービス需要発生分布(1)

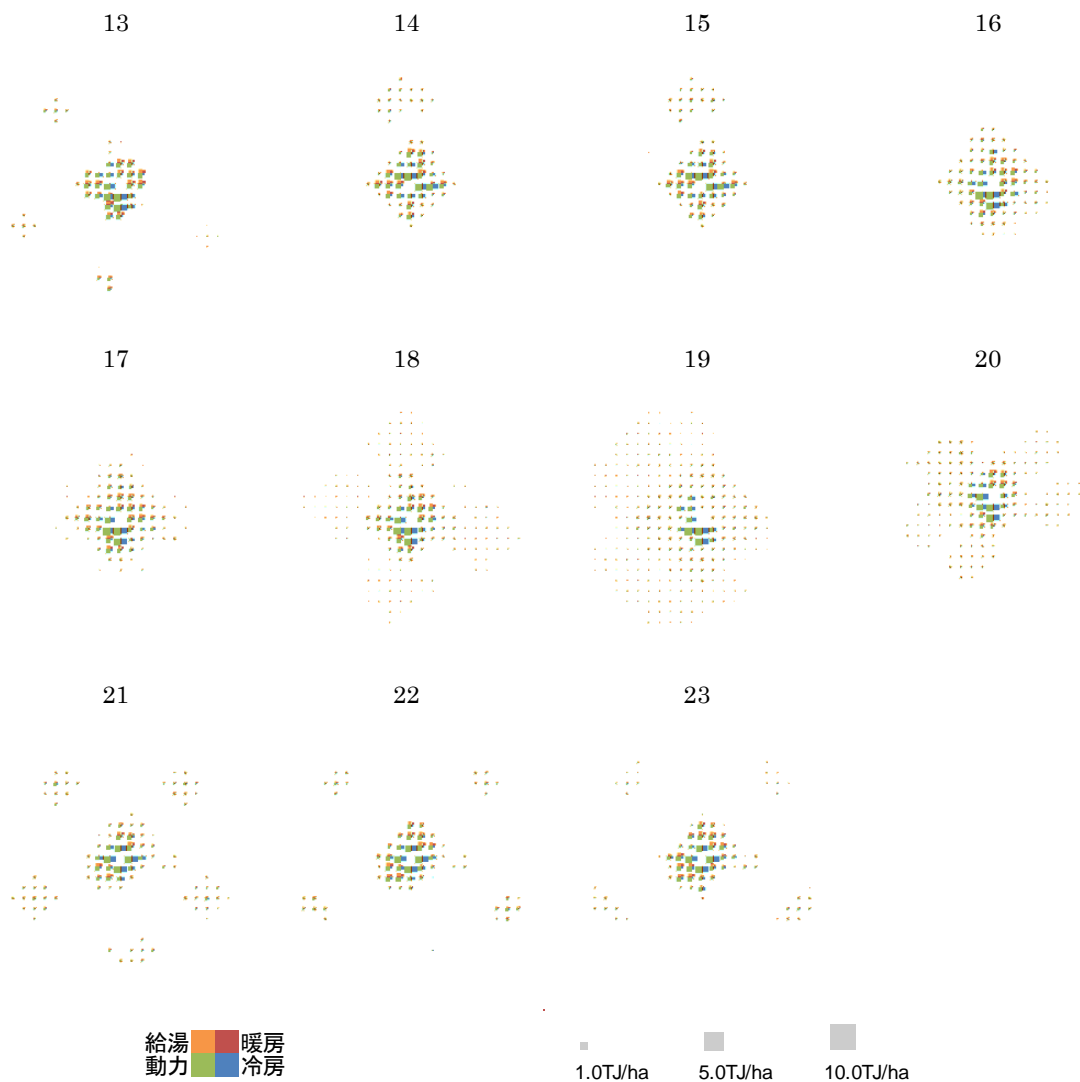


図 3-21 地区条件 B での 23 種類のエネルギーサービス需要発生分布(2)

(3) 結果

1) 地区条件A：ベースケース

二酸化炭素排出ペナルティを課さないベースケースは、特に二酸化炭素排出削減を意図せずに、地域全体のエネルギーコストが小さくなるようなシステムを導入した場合である。

各建物配置に対するエネルギー購入・受入量を図 3-22 に、最終エネルギー消費量を図 3-23 に示す。エネルギーサービス需要の差異に比較すると、最終エネルギー消費量、エネルギー購入・受入量にはより大きな差が生じている。

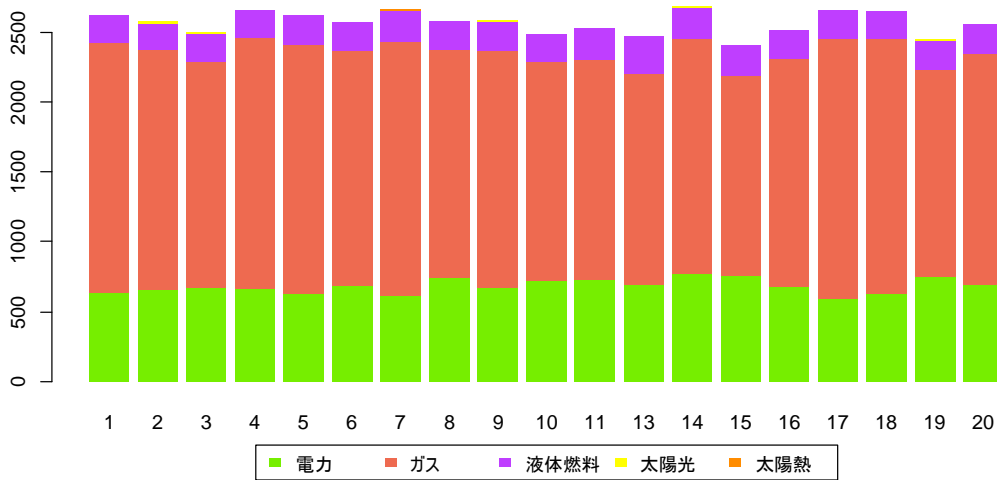


図 3-22 地区条件 A でのベースケースにおけるエネルギー購入・受入量[TJyear]

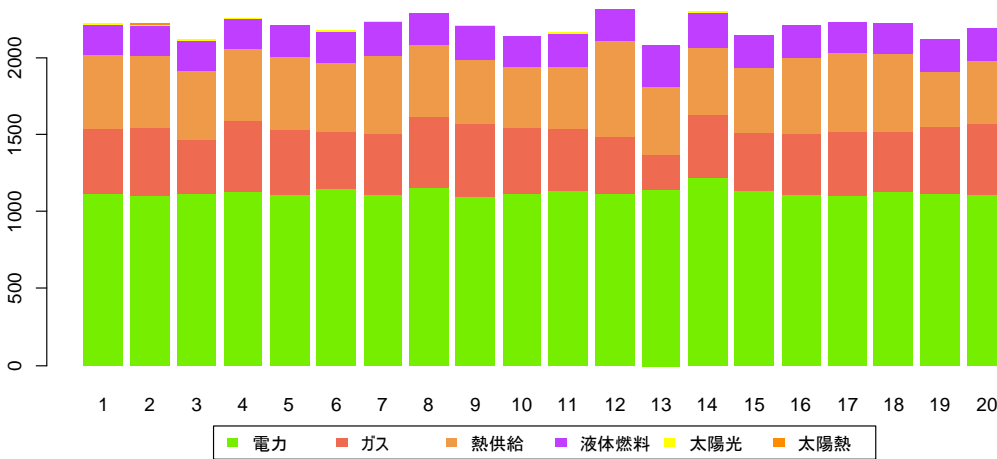


図 3-23 地区条件 A でのベースケースにおける最終エネルギー消費量[TJyear]

各建物配置指標とエネルギー消費量・二酸化炭素排出量・システムコストの相関係数を、表 3-18 に示す。なお、これらは年間平均値であり、システムコスト中の設備費用（設備投資額）も年経費率<sup>7</sup>を用いて年間負担額に換算している。

今回の建物配置（サンプル数）は 20 であり、5%水準で相関係数が有意である、すなわち相関係数がゼロでないことが棄却されるためには、相関係数絶対値が 0.45 以上である必要がある<sup>8</sup>。ここから、有意な相関を示している、すなわち相関係数絶対値が 0.45 以上である建物配置指標とパラメータとして、システムコストと人口密度が挙げられる。この関係を図 3-24 に示す。

また、システムコストを、エネルギー購入費用、地区内エネルギー転換設備コスト、地区内エネルギー配送コスト、建物内エネルギー利用設備コスト、自動車設備コストに分けて、それぞれの項目ごとに相関を調べてみたところ、土地の混合利用度は、地区内エネルギー転換設備コストと正の相関があり、建物内エネルギー利用設備コストと負の相関があった。すなわち、土地の混合利用度の指標が大きい建物配置では、地域熱供給を活用することで個別空調への投資を抑制し、全体としてもエネルギーシステムコストが小さくなっている。人口密度についても概ね同様の関係があった。

表 3-18 地区条件 A での各建物配置指標とベースケースにおける  
エネルギー消費量・CO<sub>2</sub> 排出量・システムコストの相関係数

指標	エネルギー購入・受入量	最終エネルギー消費量	CO <sub>2</sub> 排出量	システムコスト
人口密度	-0.147	0.388	-0.291	-0.675
連続度	0.149	0.048	0.137	-0.104
集結度	0.057	0.087	-0.186	0.077
クラスタ度	-0.139	-0.297	0.265	0.312
中心集中度	0.020	0.218	-0.350	-0.179
核数	0.052	-0.184	0.163	0.284
土地の混合利用度	-0.075	0.291	-0.330	-0.429
土地利用の近接度	0.055	-0.195	0.432	0.175

<sup>7</sup> 割引率（利子率）を $r$ 、設備寿命（支払期間）を $L$ としたとき、 $r/(1 - (1 + r)^{-L})$ で表される。年経費率の寿命期間での現在価値換算後総和は $1(\sum_{t=1}^L r/(1 - (1 + r)^{-L}) \times 1/(1 + r)^t = 1)$ となる。

<sup>8</sup> 相関係数（ピアソンの積率相関係数）の検定は、標本の大きさを $n$ 、標本相関係数を $r$ としたとき、検定統計量 $t_0 = |r|\sqrt{n - 2}/\sqrt{1 - r^2}$ が自由度 $n - 2$ の  $t$  分布に従うことから。

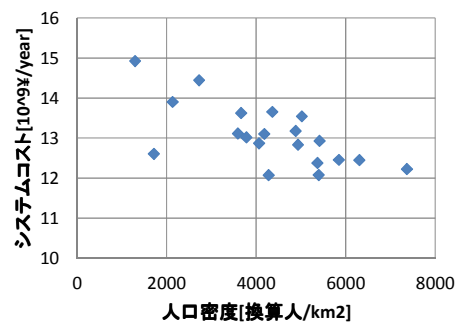


図 3-24 地区条件 A での相関の高い建物配置指標とパラメータ

## 2) 地区条件A：二酸化炭素排出ペナルティケース

各建物配置指標とエネルギー消費量・二酸化炭素排出量・システムコストの相関係数を、表 3-19 に示す。有意な相関を示している、すなわち相関係数絶対値が 0.45 以上である建物配置指標とパラメータとして、システムコストと人口密度、システムコストと土地の混合利用度が挙げられる。土地の混合利用度の指標が大きいほど、また人口密度の指標が大きいほど、システムコストが小さくなる。これらの関係を図 3-25 に示す。

いずれの建物配置指標も、二酸化炭素排出量と有意な相関を持たなかった。これは、いずれの建物配置も、¥5,000/tCO<sub>2</sub> という二酸化炭素排出ペナルティに対しては同程度に低い二酸化炭素排出レベルに抑制できる可能性があることを意味する。

表 3-19 地区条件 A での各建物配置指標と二酸化炭素排出ペナルティケースにおける  
エネルギー消費量・CO<sub>2</sub> 排出量・システムコストの相関

指標	エネルギー購入・受入量	最終エネルギー消費量	CO <sub>2</sub> 排出量	システムコスト
人口密度	-0.284	0.149	0.149	-0.581
連続度	-0.094	-0.025	0.161	-0.138
集結度	0.121	0.248	-0.229	-0.017
クラスタ度	-0.035	-0.332	-0.271	0.367
中心集中度	0.005	0.303	-0.080	-0.258
核数	0.090	-0.094	0.052	0.313
土地の混合利用度	-0.102	0.183	-0.175	-0.408
土地利用の近接度	-0.021	-0.353	0.031	0.266

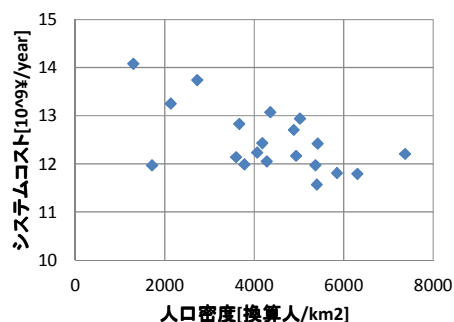


図 3-25 地区条件 A での相関の高い建物配置指標とパラメータ

### 3) 地区条件A：両ケースの差

次に、ベースケースに対して、二酸化炭素排出ペナルティケースにおけるエネルギー消費量の減少・二酸化炭素排出量の減少・システムコストの増加と、各建物配置指標との相関を調べた結果を表 3-20 に示す。

有意な相関を示している、すなわち相関係数絶対値が 0.45 以上である建物配置指標とパラメータとして、二酸化炭素排出量削減とクラスタ度、システムコスト増加と人口密度がある。クラスタ度の指標が大きいほど二酸化炭素排出量が追加的に削減されている。これらの関係を図 3-26 に示す。二酸化炭素排出削減のためには、太陽光発電や建物内コジェネの導入が増加し、ガス給湯や地域熱供給による冷暖房が減少している傾向があった。

二酸化炭素排出抑制を明示的に行わないベースケースでも、エネルギーコスト削減という経済性の点から地域熱供給などが導入されているが、クラスタ度が高い、すなわち需要が過度に集中しているのではなくクラスタ単位で均質化している場合には、太陽光発電や建物内コジェネへの導入の実施による二酸化炭素排出削減可能性があることを示している。

表 3-20 地区条件 A での各建物配置指標と両ケースの  
エネルギー消費量・CO<sub>2</sub> 排出量・システムコストの差の相関

指標	エネルギー購入・受入量削減	最終エネルギー消費量削減	CO <sub>2</sub> 排出量削減	システムコスト増加
人口密度	0.276	0.280	-0.407	0.508
連続度	0.362	0.112	0.040	-0.052
集結度	-0.125	-0.322	-0.047	-0.280
クラスタ度	-0.132	0.177	0.459	0.029
中心集中度	0.018	-0.238	-0.320	-0.145
核数	-0.080	-0.091	0.139	-0.031
土地の混合利用度	0.068	0.083	-0.236	0.220
土地利用の近接度	0.110	0.360	0.438	0.177

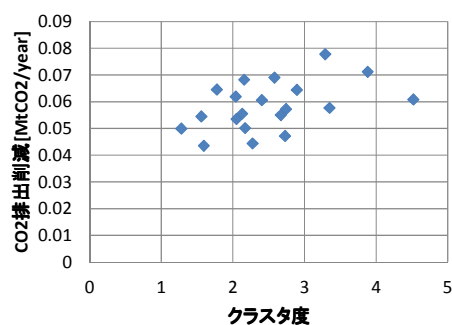


図 3-26 地区条件 A での相関の高い建物配置指標とパラメータ

#### 4) 地区条件Bと地区条件Aの比較

地区条件 B でも同様に、ベースケースについて各建物配置指標とエネルギー消費量・二酸化炭素排出量・システムコストの相関係数を調べた結果を表 3-21 に示す。地区条件 B に対して生成した建物配置の種類は 23 であったから、5 %水準で有意といえる相関係数は絶対値が 0.41 以上のときである。

表 3-21 地区条件 B での各建物配置指標とベースケースにおける

エネルギー消費量・CO<sub>2</sub> 排出量・システムコストの相関係数

指標	エネルギー購入・受入量	最終エネルギー消費量	CO <sub>2</sub> 排出量	システムコスト
人口密度	0.249	0.718	-0.506	-0.568
連続度	0.307	0.315	-0.163	-0.227
集結度	-0.585	-0.108	-0.234	-0.046
クラスタ度	0.335	-0.174	0.303	0.260
中心集中度	-0.449	0.032	-0.340	-0.310
核数	0.062	-0.131	0.001	0.169
土地の混合利用度	0.260	0.442	-0.459	-0.440
土地利用の近接度	0.493	0.147	0.098	-0.067

表に掲げた範囲では、地区条件 A、地区条件 B で共通して有意な相関を示した指標とパラメータの組として、人口密度とシステムコストがあった。また、コストの内訳等を比較したところ、人口密度と建物内エネルギー利用設備コストは地区条件 A、地区条件 B で共通して有意な相関を示した。

これらを図 3-27 に示す。

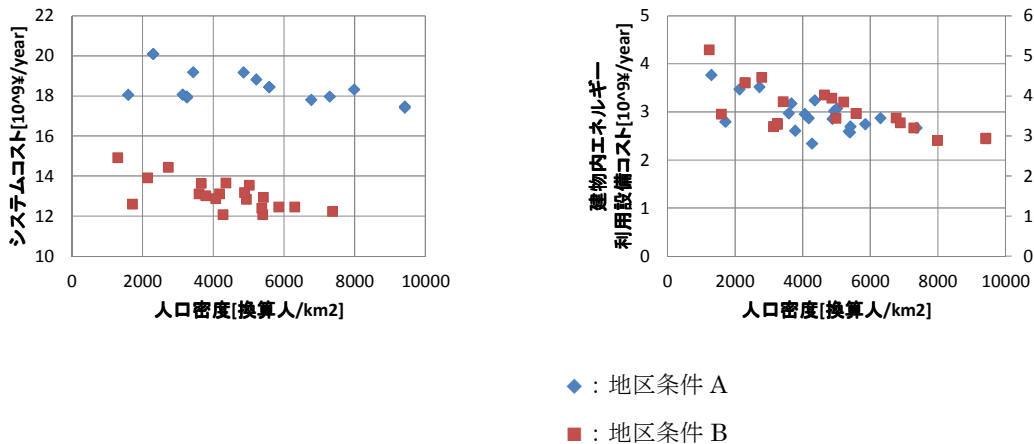


図 3-27 地区条件 A・B で共通して相関の高い建物配置指標とパラメータ



#### (4) 考察

##### 1) 熱需要密度と熱供給の利用

国土交通省「低炭素まちづくり実践ハンドブック」[24]では、熱需要密度が高ければ地域熱供給の導入可能性があり、その目安として町丁目単位で  $4.2\text{TJ/ha}\cdot\text{年}$  以上、もしくはグロス容積率(土地面積に占める建物床面積の割合)が  $100\%$  以上であること挙げられている。

今回の各建物配置の中で、地域熱供給(コージェネレーション)が導入された街区、もしくは隣接街区から熱需要(暖房需要、冷房需要)の半分以上の供給を受けている街区の、熱需要密度の分布は図 3-28 のようになった(熱需要の自然対数を横軸に取っている)。ベースケース、二酸化炭素排出ペナルティケースのいずれにおいても、街区単位で熱需要密度の自然対数が  $1$  以上であれば熱供給が行われやすくなり、熱需要密度  $[\text{TJ/ha}]$  の自然対数が  $1.5$  以上であればほとんどの場合で熱供給が利用されている。 $4.2$  の自然対数は  $1.43$  であるから、この結果は前述した国土交通省の目安とほぼ整合している。

また、今回の各建物配置の中で、熱利用を行っている(コージェネレーション導入もしくは隣接街区から熱受入)街区のうち、住宅・非住宅の用途混合が生じている街区の熱需要の分布は図 3-29 のようになった。熱需要が一定以上に大きければ用途混合が生じていなくても熱利用が行われているが、そうでない場合は用途混合が行われている比率が高い。国交省の同ハンドブックでも、複合的な土地利用が図られている市街地では負荷の平準化効果があり、分散型電源の導入効果が高まることが指摘されている。

熱供給についてはこのように、地区範囲での建物配置指標を導入しなくとも、地点ごとの熱需要の分布から、その導入適否をある程度判断することができる。

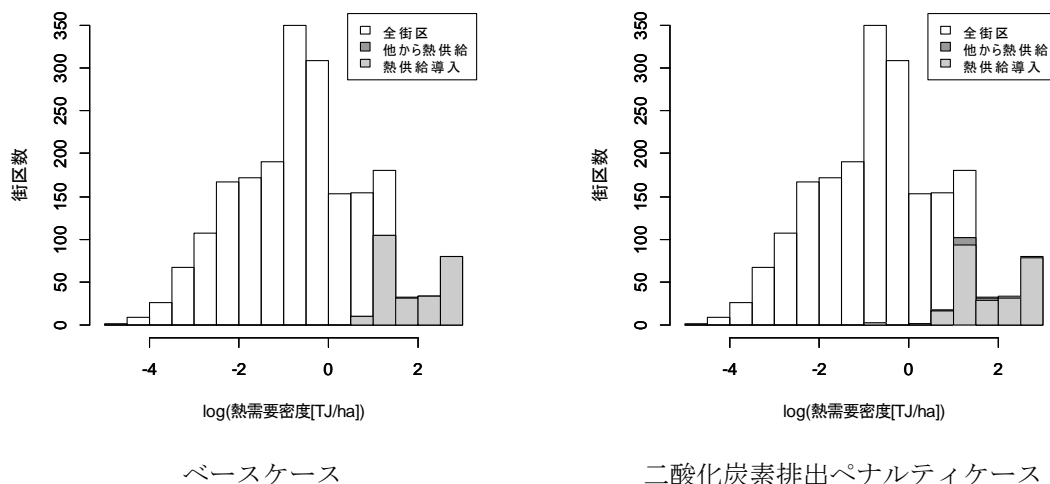
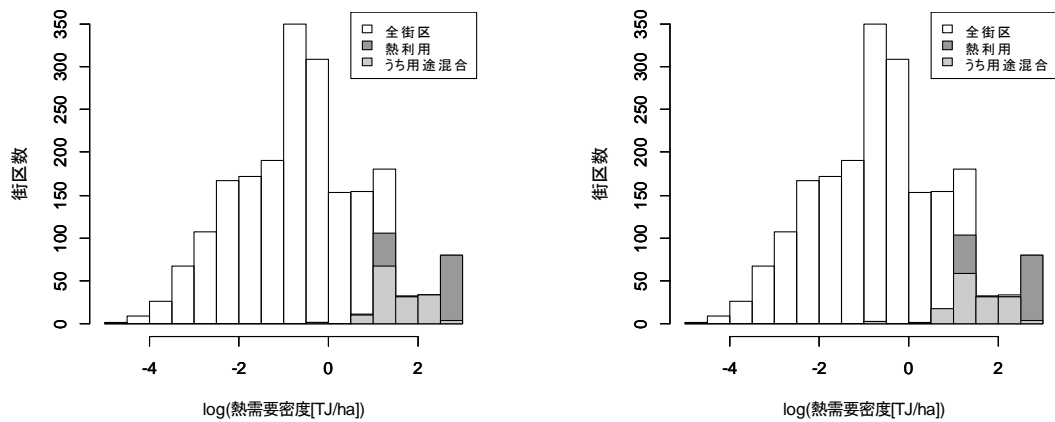


図 3-28 熱需要密度と地域熱供給の利用

横軸は熱需要密度の自然対数。



ベースケース

二酸化炭素排出ペナルティケース

図 3-29 熱需要密度・用途混合と地域熱供給の利用

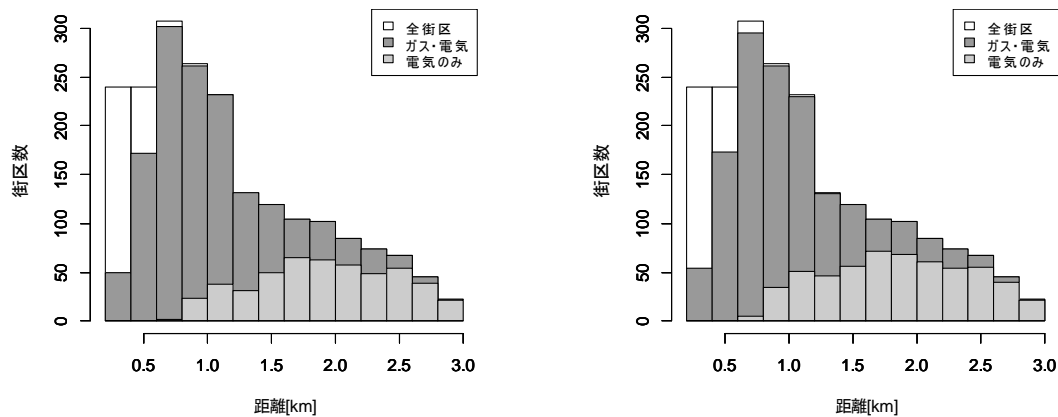
横軸は熱需要密度の自然対数。

## 2) 市街地周辺部のエネルギーシステム

市街地の中心では、いずれのケースでも地域熱供給（コジェネレーション）が選択されていた。一方で、需要が集中している中心部から周辺部へ向かうに従って、熱、そしてガスの選択比率が減少していく。中心部からの距離と最終消費されたエネルギー種別の関係を、図 3-30 に示す。熱はその配管コストが高いことから、熱利用は中心部より 0.5km 以内に集中している。地区中心部から 2km 程度離れると、電気のみが最終消費するエネルギーとして選択される比率が高くなっている。

将来、地区の電気・ガス・熱などのエネルギー供給全体を一事業体が担うようになれば、建物の位置関係に応じてエネルギー供給方法を変えることで、エネルギーサービス需要を満たしつつ全体コストを引き下げられることを示唆している。

同様のことは、既に都市ガスと LP ガスの棲み分けという現象で生じている。例えば旭川ガスの導管敷設エリアと人口分布を図 3-31 に示すが、人口の多い地区にガス導管敷設エリアが限られていることがわかる。今回の分析では、数キロメートルという狭い範囲でも、需要密度によってはこのようなエネルギー供給方法の組み合わせが効率的である可能性が示された。なお、ここではエネルギー供給のみを対象としているが、上下水道との同時敷設によりガス配管の追加コストを抑制できる可能性もある。



ベースケース

二酸化炭素排出ペナルティケース

図 3-30 中心部からの距離と最終エネルギー消費

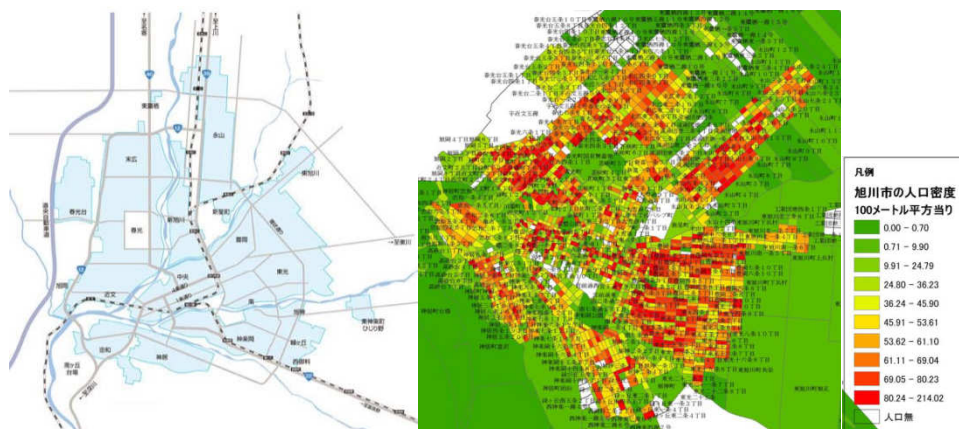


図 3-31 旭川市街地のガス導管敷設エリア (左) [103]と地区別人口 (右) [104]

図上の縦辺は約 12km。両図は 45° 向きが異なっている。

### 3) 建物配置指標の有効性

既存文献を参考とした建物配置指標を導入し、望ましいエネルギーシステムの目安を示す指標がないかを探索した。エネルギー購入・受入量、最終エネルギー消費、エネルギーシステムコスト、二酸化炭素排出量といったパラメータは、地区のエネルギーシステムの総体として表れてくるものであり、特定の建物配置指標のみで表現することは困難であった。

上述した熱需要密度の高いところでの熱利用や、市街地周辺部の電化についても同様のことが言える。つまり、それぞれのシステムの導入適否は、地点もしくは建物配置に関する指標で評価できる可能性があるが、それがエネルギー購入量の削減や二酸化炭素排出の削減のために適用が望ましいかどうかは、他のシステムとの相対比較において検討される

べきものである。

## (5) 結論

本検討では、建物配置の違いによる最適エネルギーシステムの違いについて分析を行った。

熱供給については、今回対象としたような数キロメートル四方の地区全体で議論する必要はなく、街区単位の熱需要密度なども導入を検討する際の十分な目安となっていた。一方で、ガス・電気混合は地区全体の需要分布を見ることは、インフラコストを削減するという点での効果はあった。建物配置の違いが、直接エネルギー購入・受入量や二酸化炭素排出量の大幅な増減に繋がるわけではなかった。

また、今回検討したような規模のエネルギーシステムモデルでは、建物配置指標を計算できるだけの居住人口や業務部門建物の延床面積分布データを有していれば、直接エネルギー需給計算を行うことが可能で、間接的な指標からエネルギーシステムの見当を付けるというアプローチは必要がない。ただし、より詳細なモデルを十分な計算機資源で解いた結果から建物配置指標を用いた一般的な知見を得ることができれば、常にこのようなエネルギー需給計算が可能なのではない個別の地区にとって、建物配置指標がエネルギーシステム選択の目安にはなり得る。

### 3.3.2. 人口減少下の地区のエネルギーシステム

#### (1) 本検討の目的

日本の地方都市が目指すべき都市構造として、国土交通省の設置した都市再構築戦略検討委員会の中間とりまとめ[105]は、「人口減少下のまちづくりに当たっては、(中略)現在の市街地(DID)を中心として、場合によっては希薄化した市街地を縮小しながら、集住を推進することが何よりも必要」としている。また、国土交通省の都市計画制度小委員会の中間とりまとめ[106]では、集約型都市構造化は、都市の低炭素化の「実現のための主要な方策であるため、都市の低炭素化の枠組みの中で集約型都市構造化を進めるための対応の方向性と早急に講ずべき措置の全体像」について述べている。

今後日本の大半を占める高齢化・人口減少が進展していく地区を対象に、集約型の建物配置がエネルギー供給に与える影響と、集約による総追加コストやメリットに比較したときのエネルギー供給の寄与の度合いについて分析する。

#### (2) 前提条件

一世代に相当する30年間の変化を分析対象として、この間に人口は「変化なし」「増加」「減少」の3シナリオを、建物配置は「集約」「変化なし」の2シナリオを想定した。

初年度の建物配置は千葉県柏市付近を想定したものであり、人口の想定は表 3-8 に示した地区 A と同一であり、初年度の建物配置は図 3-19 に示した番号 1 のものに相当する。

人口シナリオは今後30年間の人口変化率年平均が、それぞれ±0%・年1%増加・年1%減少となるよう、人口・世帯動態モデルのパラメータを修正した。具体的には、結婚の時点で地区外への転居もしくは地区外からの配偶者の転居の比率を変化させることで、これら比較的若い世代の流入・流出が起きることを模擬した(図 3-32)。なお、いずれのケースもそれ以降の人口変化には減少圧力が働く。

建物配置の「変化なし」シナリオでは、世帯はいったん居住地を定めると転居せず、独立・結婚等による新規世帯は既存の人口密度に従って一様に居住するものとした。「集約」シナリオでは、住民に対し、まちなかへの転居を促進するものとした。具体的には、各時点での世帯構成が変化した世帯と独立・結婚等による新規世帯が転居するものとして、転居先は直前時点での人口密度が高い地点がさらに選ばれやすくなるとし、需要の集約が進むものとした(図 3-33)。業務部門建物は集約の対象外とした。

これらを組み合わせて、表 3-22 に示す6つの人口・建物配置変化シナリオを設定した。

表 3-22 人口・建物配置変化シナリオ

		人口	建物配置
1	人口一定・配置一定	変化なし	変化なし
2	人口一定・配置集約	変化なし	集約
3	人口増加・配置一定	増加	変化なし
4	人口増加・配置集約	増加	集約
5	人口減少・配置一定	減少	変化なし
6	人口減少・配置集約	減少	集約

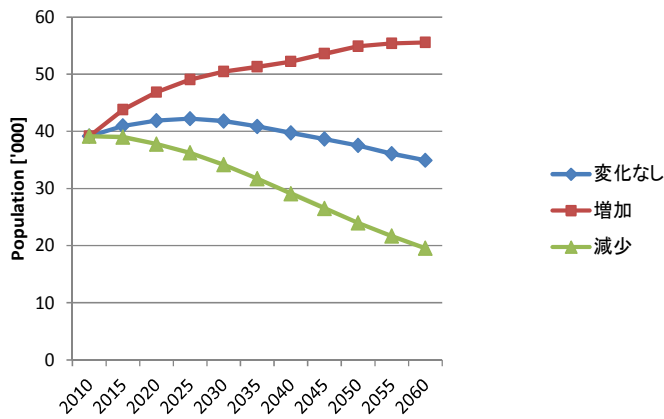


図 3-32 人口シナリオ

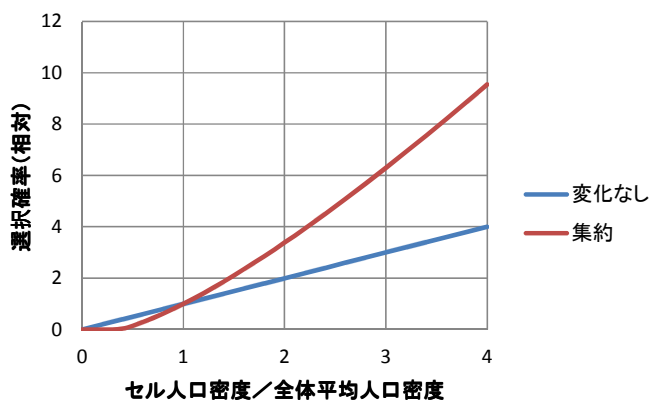


図 3-33 建物配置「変化なし」シナリオと「集約」シナリオの前提

エネルギー需給計算におけるパラメータ設定は、表 3-11 に掲げたものと同じとした。ただし、計算の初年度で導入されたエネルギーシステムのうち、コジェネレーション、エネルギー配送設備は寿命を 40 年とおいているため、一部は 30 年後にもまだ残存する。エネルギーシステムの選択は、この設備の残存も考慮した上で行われるため、エネルギーサービス需要は同条件である初年度であっても、同じエネルギーシステムが選択されるとは限らない。なお、その他の設備は寿命を 30 年未満に設定している。

表 3-22 に示した 6 つの人口・建物配置変化シナリオにおけるエネルギーサービス需要合計の、30 年間の変化を図 3-34 に示す。建物配置の変化は、エネルギーサービス需要の合計には影響を与えていない。エネルギーサービス需要の分布は、図 3-35 に示すように配置集約シナリオではもともと居住人口が多かった中心部へ集約している。

ここでは移動需要の変化について、人口変化や高齢化による変化は考慮しているが、市街地内の建物配置集約により減少する可能性については考慮していない。

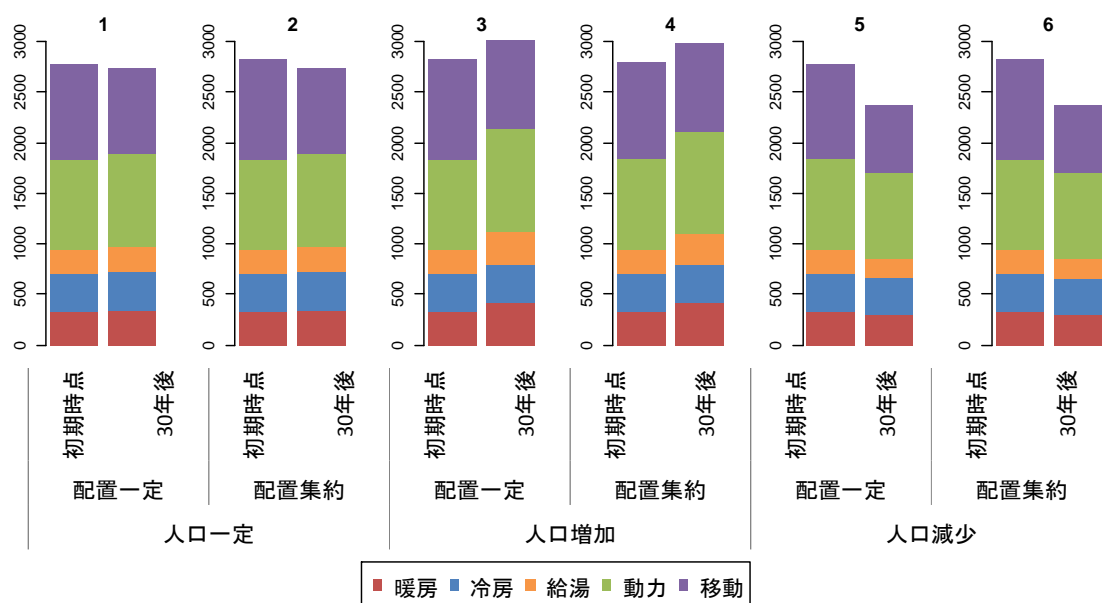


図 3-34 エネルギーサービス需要の変化[TJ/year]

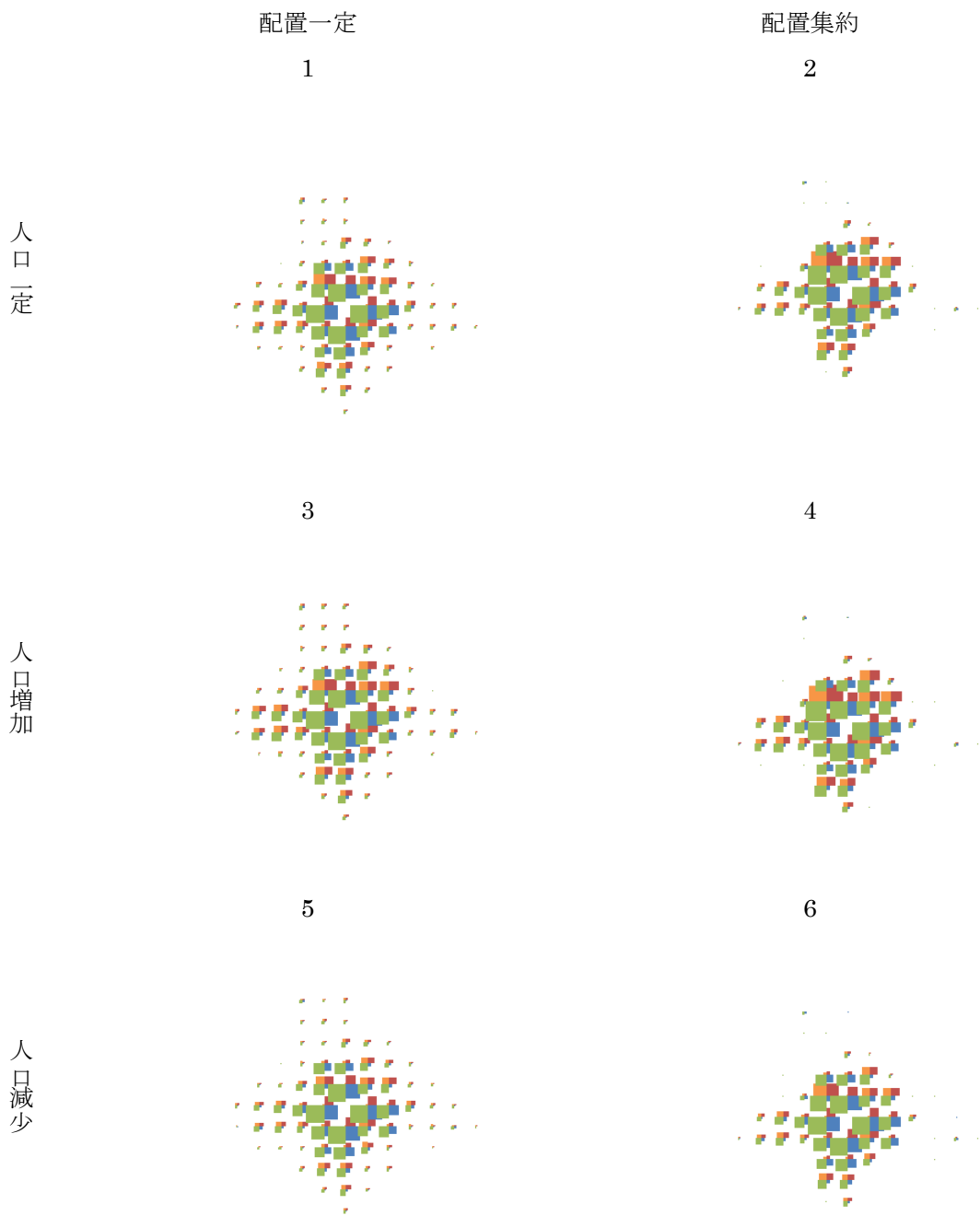


図 3-35 エネルギーサービス需要の分布の 30 年後



### (3) 結果

各建物配置に対するエネルギー購入・受入量を図 3-36 に、最終エネルギー消費量を図 3-37 に示す。

人口の変化がエネルギー購入・受入量や最終エネルギー消費量の総量を主に変化させている。構成では、建物配置が集約されていくケースでは、そうでない各ケースに比較し、ガスや熱の利用比率がやや増加している。最終エネルギー消費にはほぼ差が無く、今回の条件では、コジェネレーションによる自家発電と系統電力からの電力購入がほぼ同一のコスト条件にあったものによる結果であると思われる。

二酸化炭素排出量は図 3-38 のようであり、エネルギー購入・受入量に差がないのと同様、配置による差はほとんどなかった。

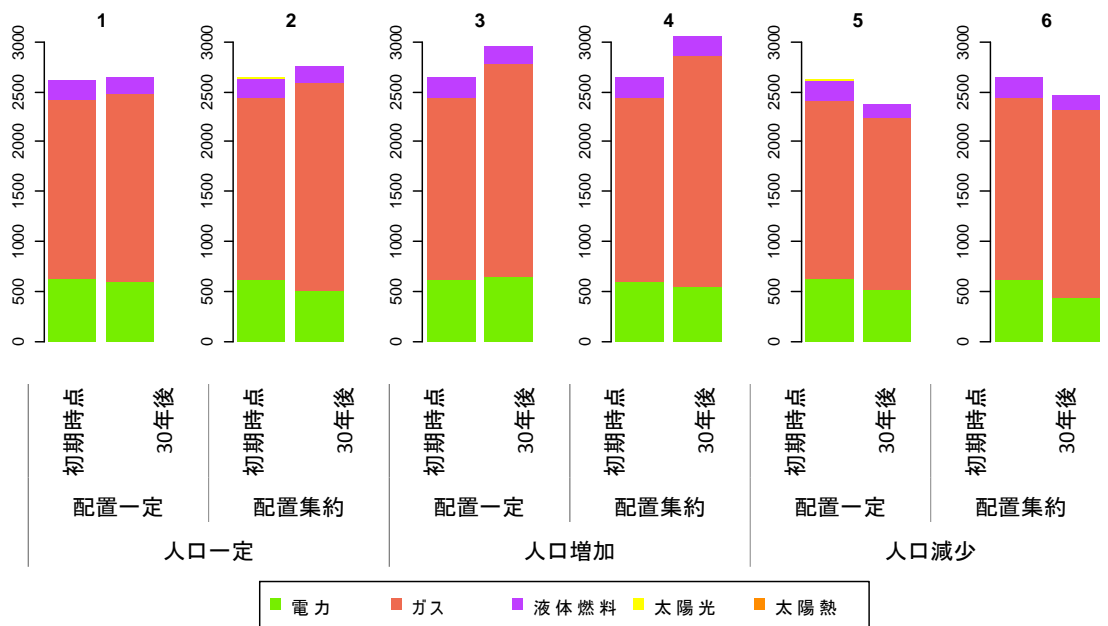


図 3-36 エネルギー購入・受入量[TJ/year]

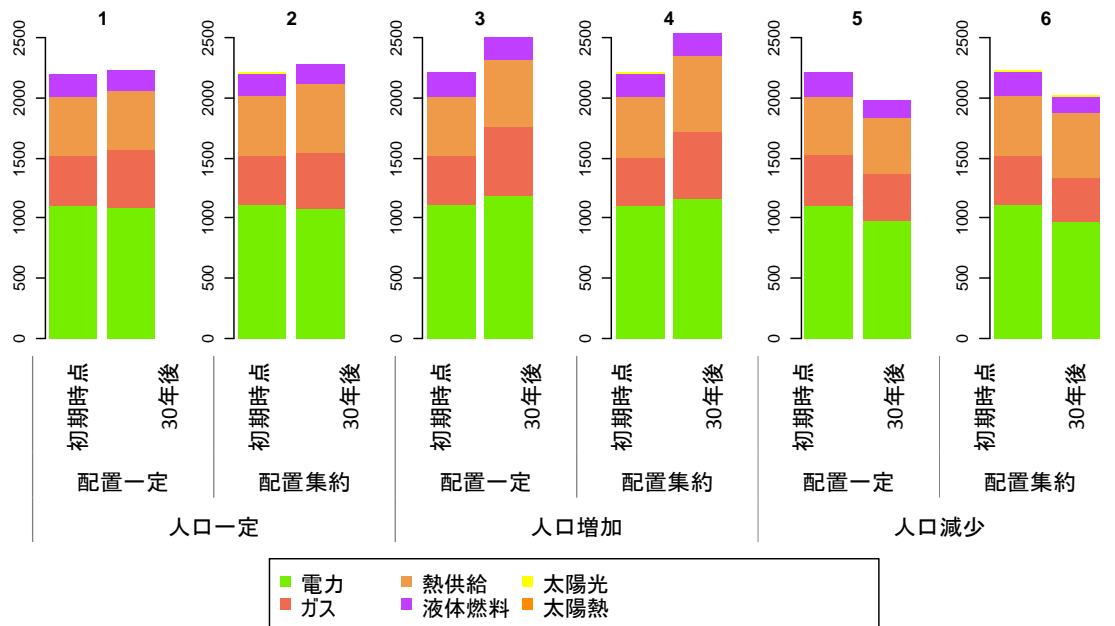


図 3-37 最終エネルギー消費量[TJ/year]

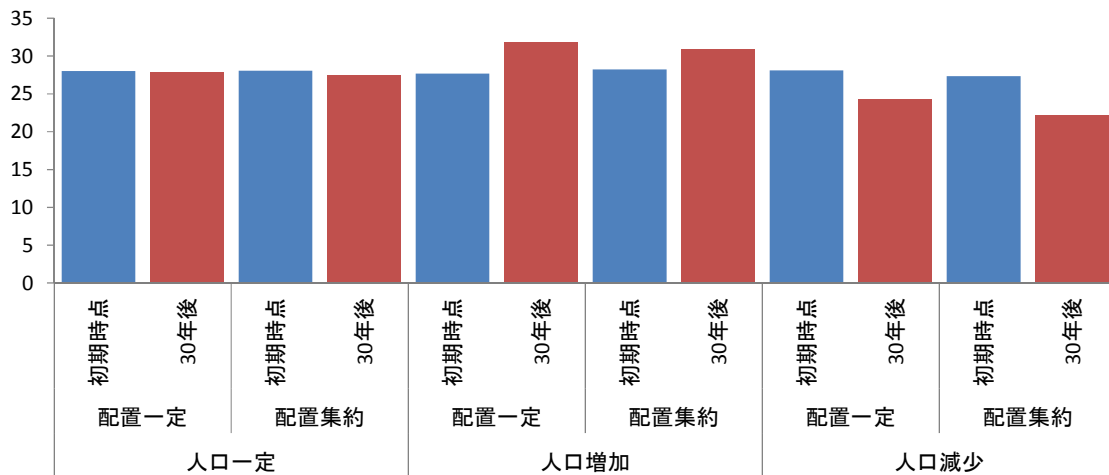


図 3-38 二酸化炭素排出量[万 t-CO2]

系統電力の二酸化炭素排出係数は 0.3kgCO<sub>2</sub>/kWh で計算。

将来の人口に応じて、コジェネレーション容量と導入地点数に差が見られた。これを図 3-40 に示す。配置が集約するほどより多くのコジェネレーション導入容量・地点数が導入されるが、特に人口減少ケースでその差が大きかった。また、エネルギー配送インフラの整備状況を図 3-39 に示す。前節で述べたとおり、市街地周辺部にはガス管敷設よりも配電のほうが低コストであるが、建物配置を集約することにより、市街地周辺部に供給していた電力の配電コストが削減でき、ガスでの供給が行われている。

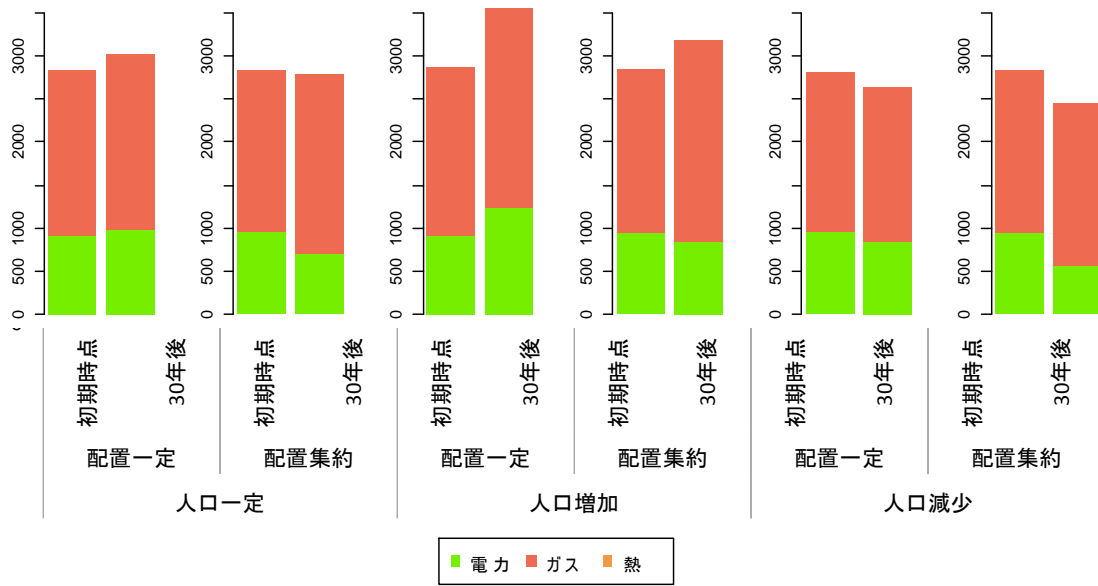


図 3-39 エネルギー配送インフラ量

縦軸の単位は MJ/h・0.2km

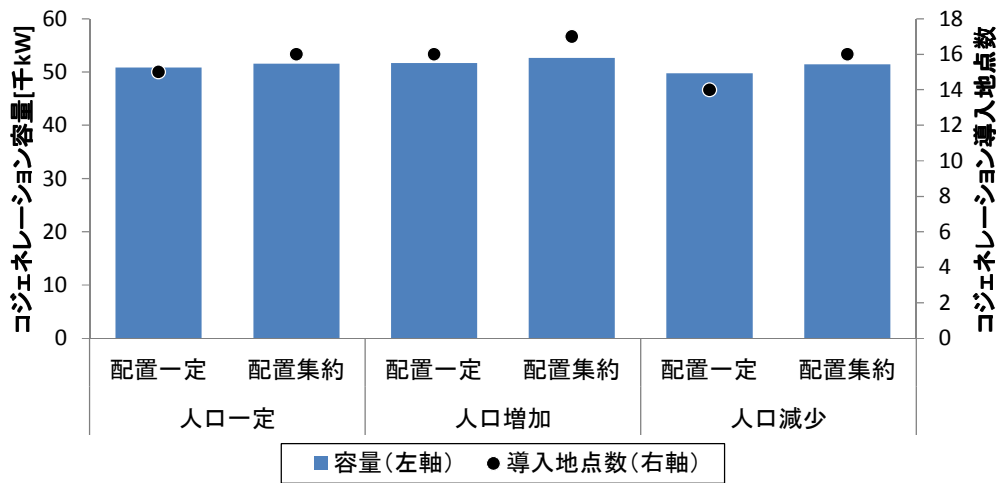


図 3-40 コージェネレーション容量と導入時点数(初期時点)

(4) 考察

1) 集約による低炭素化への影響

エネルギー供給の点に着目したとき、市街地建物の集約による効果の可能性として、大規模なほど効率向上や単価低減が見込める設備を導入・共用することで、最終エネルギー消費量や一次エネルギー供給量を削減できることが挙げられる。この例がコージェネレーションであり、本分析では特にこれに着目している。

集約した建物配置、特に業務部門が一定以上集中した配置での、コージェネレーション導

入の効果は経済的にも大きかった。ただし、今回シナリオとして与えた住宅の集約（まちなかへの転居推進）では、エネルギー購入量の削減や低炭素化を推し進めるほどのエネルギーサービス需要の集約には至らなかった。また、人口減少下、また建物の断熱強化の流れにおいては、熱需要の縮小に伴ってコージェネレーションの稼働率が低下する恐れがあり、建物配置の集約を進める、もしくはスケールメリットを発揮するための街区間の熱融通を予め計画しておくことが有効な可能性がある。

## 2) 都市集約の費用・効果におけるエネルギー供給の影響

和田ら[107]は、都市の再編成の過程における二酸化炭素排出やコストに着目し、国内の都市を対象とした試算において、再編成時に排出される二酸化炭素や要するコストの、運用時の二酸化炭素排出量削減やコスト削減による回収に長期を要することを指摘している。長岡市（2005年以前の旧長岡市）に手法を適用した場合、BAUに相当する「市場シナリオ」と、集約化のひとつである「多心シナリオ」の、再編に係る総コストと運用時のコストは表 3-23 のとおりであり、市場シナリオに対する投資回収年数は約 20 年と評価されている。エネルギーインフラ（ガス管、電線）の変化も評価されているが原単位を用いた評価に留まる。

これに対し、本研究で得られたエネルギー供給に関するコストのインパクトのオーダー感を比較してみる。人口 28 万人・市街地面積 47km<sup>2</sup> に及ぶ長岡市全体を集約することは、本研究で対象としている市街地地区の集約とは単純に比較できないが、今回対象とした地区は人口 4.7 万人、市街地面積 4km<sup>2</sup> 程度であるため、5～10 分の 1 程度の規模である。すなわち市街地単位で集約を行うことには、500～1,000 億円の投資コストが追加的にかかるが、年間 30～60 億円の運用コスト削減が見込まれる。

表 3-23 先行研究における都市再編の投資コストと運用コスト

	再編に係る投資コスト[十億円]	運用時のコスト[十億円/年]
市場シナリオ	4,200	112
多心シナリオ	4,700	85
差	+500	-27

[107]より。グラフの読み取り値のため、正確な値ではない。

再編に係る投資コストに含まれるのは、都市施設（森林、農地、道路、宅地、公園、上下水道、都市ガス、電気）の新設・転換費用、都市施設の除却・廃棄費用、再編成期間中の都市施設の更新・維持費用、建物の除却・廃棄費用、建物の新築費用、再編成期間中の建物の維持費用。

運用時のコストに含まれるものは、毎年の都市施設・農林業用地の更新・維持費用、毎年の建物の除却・廃棄費用、毎年の建物の新築費用、毎年の建物の維持費用。

今回の需要一定ケースにおいては、エネルギー転換・配送・利用コストとエネルギー購入費は表 3-24 のとおりであった。需要家側のエネルギー利用設備（例えば給湯器、乗用車等）も含んでいる。本モデルでは、設備は積極的に廃棄せず寿命に達したときに自然に除却されると想定しているため、配置を集約する際にかかるコスト（表 3-23 における「再編

における投資コスト」に相当)は計上できない。

集約で見込めるエネルギー関係での運用のコスト削減は、インフラ節減で年間 3 億円、エネルギー購入費節減で 1 億円のオーダーである。前述の推計では、都市施設・建物等全体の運用コスト削減額は 30~60 億円であった。これに比較すると、エネルギー購入費節減のインパクトは小さく、エネルギーインフラ節減の効果はある程度のインパクトを持っている。都市配置の集約による費用面での議論においては、エネルギーを道路・水道等と同様のネットワークインフラとして捉えればよく、エネルギー供給の効率化がもたらす効果は大きくない。

表 3-24 本研究における建物配置と運用コスト(需要一定ケース)

	運用時のコスト[十億円/年]	
	設備コスト年経費	エネルギー購入費
配置一定	6.41	5.66
配置集約	6.08	5.59
差	-0.33	-0.07

## (5) 結論

本検討では、地区の人口変化と、建物配置の集約がエネルギー供給に与える影響を分析し、集約による総追加コストやメリットに比較したときのエネルギー供給の寄与の度合いについて分析を行った。

建物配置の集約として、住民を対象にまちなか転居を促進するというシナリオをおいたが、周辺部のエネルギー配送インフラ削減には効果が見られたものの、地区全体に対するエネルギー・二酸化炭素排出面効果は大きくなかった。先行研究で示されている都市の集約にかかる都市施設・建物等全体の運用費節減メリットに比較して、エネルギー購入費節減のインパクトは小さかった。一方で、中長期的な人口増減等に伴うエネルギーサービス需要の変化が、熱供給に関するインフラ投資の効率性に影響を与えるため、長期を見据えた計画が必要であることが示された。

### 3.3.3. 本節のまとめ

本節では、前節で説明した市街地地区の建物配置とエネルギーシステムの関係性を分析するために構築したモデルを用いて、市街地地区の建物配置とエネルギーシステムの分析を行った。まず、地区内エネルギー需給モデルの挙動の確認を行い、エネルギー技術構成に関する定性的な理解に沿った挙動を行っていること、二酸化炭素排出制約下でのコジェネレーションの選択が系統電力の排出係数によって大きく左右されることを確認した。

次に、建物配置と望ましいエネルギーシステムの関係性について分析を行った。熱供給については、今回対象としたような数キロメートル四方の地区全体で議論する必要はなく、街区単位の熱需要密度なども導入を検討する際の十分な目安となっていた。一方で、地区

全体の需要分布を勘案することによりインフラコストを削減するという点での効果はあった。

人口減少と集約という時間軸の概念を入れた分析では、先行研究で示されている、都市の集約にかかるメリットに比較して、エネルギー購入費節減の寄与は大きくはないことを確認した。一方で、中長期的な人口増減等に伴うエネルギーサービス需要の変化が、熱供給に関するインフラ投資の効率性に影響を与えるため、長期を見据えた計画が必要であることが示された。

## 参考文献

- [100] 杉原英治, 河本純, 辻毅一郎; “地域特定型総合エネルギーサービスにおける都市エネルギーシステムの多目的最適化モデルの開発” 電気学会論文誌 B, Vol. 123, No. 2, 2003
- [101] まちづくりと一体となった熱エネルギーの有効利用に関する研究会; 「まちづくりと一体となった熱エネルギーの有効利用に関する研究会 中間とりまとめ」, 平成 23 年 8 月.
- [102] 池上貴志, 岩船由美子, 荻本和彦; “電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発”, 電学論 B, Vol.130, No.10, pp.877-887, 2010 .
- [103] 旭川ガスウェブサイト <http://www.asahikawa-gas.co.jp/tengas/pages/area.html>
- [104] 「統計情報ラボラトリ札幌」ウェブサイト <http://www.statinfo-lab.com/>
- [105] 都市再構築戦略検討委員会; 「都市再構築戦略検討委員会 中間とりまとめ」, 2013 年 7 月
- [106] 社会資本整備審議会 都市計画・歴史的風土分科会 都市計画部会; 「都市計画制度小委員会 中間とりまとめ」, 2012 年 9 月.
- [107] 和田奈津子, 「CO2 排出量と建設コストによる都市再編成政策の評価に関する研究—長岡市のコンパクト化を事例として—」, 東京大学博士論文, 2012.

## 4. 千葉県柏市を対象としたケーススタディ

第2章、第3章の検討を実在の地区に適用し、その地区におけるエネルギーサービス需要構造変化や、それがエネルギーシステム選択に与える影響について分析を行った。

### 4.1. 分析の前提

#### 4.1.1. 対象地区の概要

##### (1) 面積・人口[108]

千葉県柏市の都市計画事業における、柏北部中央地区（「柏都市計画事業柏北部中央地区一体型特定土地地区画整理事業」の対象地区）を分析対象とした。

本地区は都心からは25km・30分圏で、2005年に開業したつくばエクスプレスの柏の葉キャンパス駅を中心として、若柴・十余二・高田・正連寺といった地区を含む。東京大学柏の葉キャンパス、千葉大学柏の葉キャンパス、国立がんセンター東病院が隣接する。

柏市の都市計画事業は2000年に開始され2022年までを予定しており、つくばエクスプレス開通後、三井不動産グループによる「柏の葉スマートシティ」構想とも連携した開発が進められている。柏北部中央地区の面積は272.9haであり、現在計画されている土地利用を図4-3に示す。計画人口は26,000人である。中心部にある大規模商業施設「ららぽーと柏の葉」が年間来場者700万人（1日約20,000人）を集客するように、居住人口に比較して昼間人口が大きい。また、オフィス・ホテル・賃貸住宅等の用途の複合ビルの建設も予定されている。

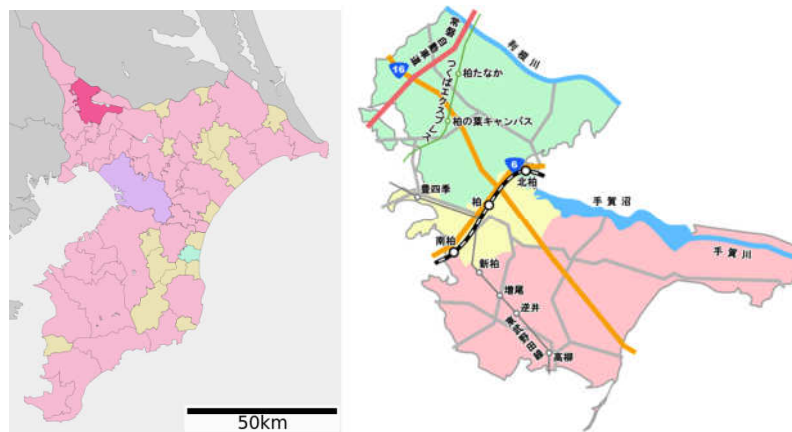


図 4-1 千葉県柏市と、柏の葉キャンパス駅の位置

左図は <http://ja.wikipedia.org/wiki/柏市> より。右図は柏市ウェブサイトより。

現在は、駅周辺部の若柴地区が先行して開発され、大規模集合住宅などが立地していることから若中年二世代の世帯が多いと考えられ、実際の人口分布（図4-2）でも30代～40



代の親と10歳未満の子の比率が特に多い。若柴・十余二・正連寺の3地区を合わせた現在の人口は約15,000人で、今後7割以上の人口増加が見込まれていることになる。

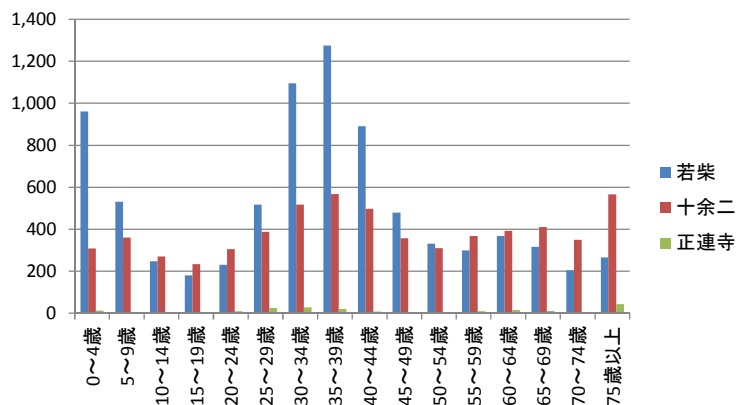
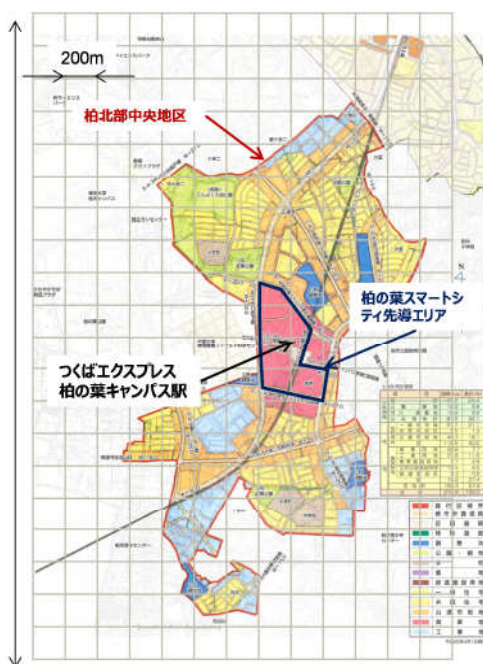


図 4-2 該当地区の年齢別人口分布 (2013年10月)

[109]より作成



		面積 [ha]	割合 [%]	
公共用地	道路	66.6	24.4	
	公園・緑地	10.3	3.8	
	河川・調整池	10.6	3.9	
	公共用地合計	87.5	32.1	
宅地	住宅用地	一般住宅地	57.7	21.1
		共同住宅地	3.5	1.3
		沿道市街地	49.3	18.1
		計	110.5	40.5
	施設用地	商業用地	20.9	7.7
		工業用地	31.6	11.6
		教育施設用地	7.7	2.8
		公共公益施設用地	12.4	4.5
鉄道施設区	2.3	0.8		
計	74.9	27.4		
宅地計	185.4	67.9		
合計	272.9	100.0		

図 4-3 柏北部中央地区の土地利用[108]

## (2) 地域における取組[110]

「柏の葉スマートシティ」構想では、「新産業創造都市」「健康長寿都市」と並び、「環境共生都市」がコンセプトのひとつに掲げられており、駅周辺の12.7haの街区（「柏の葉スマートシティ先導エリア」）において、自営送電線も整備し、太陽光発電、蓄電池なども活用して、電力ピークカットや防災力強化を図ろうとしている。建物単位でのHEMS（Home Energy Management System）、BEMS（Building Energy Management System）の導入も進められている。また、柏北部中央地区全体の二酸化炭素削減のためのロードマップを示し、2005年の一般的な街に比較して、2030年の排出量削減率60%を目標に掲げている（図4-4）。

そのほか、国土交通省・経済産業省・総務省・環境省などの、環境や交通、健康などに関する様々な実証事業のフィールドになっている。

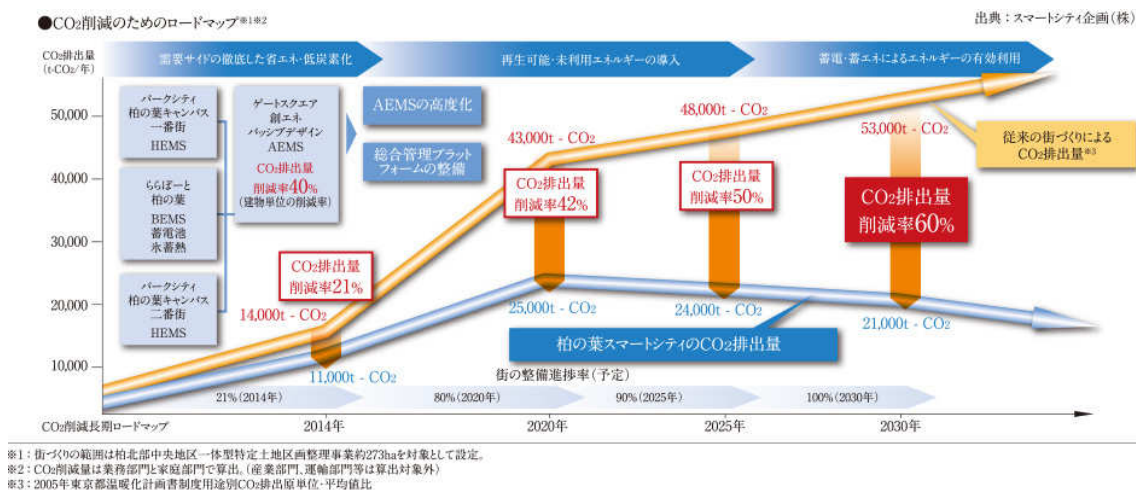


図 4-4 柏北部中央地区の二酸化炭素削減のためのロードマップ[110]

#### 4.1.2. 分析の方法

##### (1) 分析の方針

本分析においては、前章までに述べたような、人口変化と建物配置に着目した分析を行う。現在（2015年）と、図4-3で示した土地利用計画が実現したとき（2030年）、2045年の3時点进行分析対象期間とし、30年間にわたってのエネルギーサービス需要の変化や、エネルギーシステムへの影響を分析する。

この地区にエネルギーを供給する事業者が存在し、電気・ガス・熱などの供給を一手に引き受けているものとする。事業者の使命はエネルギーサービス需要を充足することであり、その手段については事業者任せられている。外部から購入したエネルギーを配送するのみでもよいし、地区内にエネルギー転換設備を設置することもできる。需要家側設備も、同一量のエネルギーサービス需要を供給できるのであれば事業者を選択権がある。この事業者は公に近い存在で、投資による短期間の利益享受を目的としておらず、金利（3%）を考慮した際に設備寿命以内に投資回収できる設備であれば投資を行える。

本分析では、実際の本地区の駅周辺で計画されている、自営送電線・蓄電池などによる電力ピークカットや防災力、建物単位でのHEMS・BEMSの導入を直接の評価対象とするわけではない。

##### (2) 対象地区のモデル化

###### 1) 人口・世帯構成

2030年までには7割以上の人口増加が見込まれ、流入者は30代～40代の親と10歳未満の子の若年家族世帯が多いと予想される。

このため、以下の前提を置いて、第2章で述べた将来人口・世帯構成の推計モデルを適用し、また建物配置に従って人口を分配することとした。なお、これは必ずしも実際の地区の状況とは一致しない。

- ・ 総人口は、2030年に向かって線型で増加する。
- ・ 増加する人口の年齢構成は、2013年現在の若柴における人口分布（図4-2）に等しいものとする。
- ・ 既に関連されている駅周辺での人口は増加しないものとする。

## 2) 建物配置

図 4-3 に示した実際の土地利用を 200m 四方(4ha)メッシュ単位で単純化し、図 4-5 に示す土地利用を作成した。また、これを同図に示す建物用途に対応させることで、前章で述べた建物配置生成モデル中の用途と整合させた。なお、建物用途「ホテル」は新たに導入した非住宅用建物用途である。これを分析対象の初年度の建物配置とする。

なお、この計画から土地面積は把握できるものの、建物の延床面積については知ることはできないため、同図に示す建物用途別床面積は想定によるものである。これらは、種類別に、地区内の建物の実績値や、同ディベロッパーが他地域で開発した建物の実績値などをもとに設定している。

また、住宅については前述した人口の想定に応じて整備されるものとし、業務部門建物はいずれも早い段階で整備されるものと想定して、基本的には初年度から考慮に入れるが、一定以下規模の店舗でかつ周辺 1km に住宅が一定以上存在しないもの（住宅街中の小規模店舗など）は初年度時点ではまだないものとした。



各セルの一边は 200m。

図 4-5 対象地区のセル毎土地利用

3.13.1.5 で導入した建物配置指標を、この地区の 2030 年の建物配置に対して算出した。これを表 4-1 に示す。本節の表 3-16 で示した、仮想の地区条件 A に対する 20 の建物配置の指標の範囲と比較してみる。人口密度は大きめ、連続度は地区条件 A に対するどれより大きい。集結度・クラスタ度・中心集中度は最小レベルである。土地の混合利用度、土地利用の近接度は最高レベルに近い。

これらのことから、二酸化炭素排出ペナルティを課さなくても、コージェネレーションを活用したシステムコスト削減に適した配置である。一方で、二酸化炭素排出ペナルティを課しても追加的な二酸化炭素削減策が行われにくい可能性がある。

表 4-1 対象地区の建物配置指標

人口密度	6,509
連続度	0.518
集結度	0.692
クラスタ度	4.79
中心集中度	0.923
核数	2
土地の混合利用度	4.34
土地利用の近接度	0.742

### (3) ケース設定

本地区に対して、エネルギー需給モデルを適用して計算を行う際のケース設定を表 4-2 に示す。人口はいずれも同じ想定を置いており、全国のトレンドと同様に 30 年間で微減する。

ケース 1 はベースラインであり、地区内エネルギー転換を行わず、かつ二酸化炭素排出削減を特に考慮せずエネルギーシステムを選択する。ケース 2 は地区内エネルギー転換を行うが、二酸化炭素排出削減を特に考慮せずエネルギーシステムを選択する。ケース 3 は、ケース 1 に比べて二酸化炭素排出削減を 2 割削減するケースである。

また、エネルギー需給計算モデルにおいては、エネルギーシステム選択以外の省エネルギー、例えば建物の断熱強化やパッシブデザインの採用、HEMS・BEMS などの導入によるエネルギーサービス需要自体の削減策を考慮していないため、これを外生的に与えたケース 4~6 を作成した。図 4-4 で示したこの地区の二酸化炭素排出削減ロードマップにおいて、これら技術等による建物単位での二酸化炭素排出削減 40%を見込んでいることを参考に、冷暖房需要が BAU よりも 4 割、動力需要が 2 割削減された状態を想定している。

電気料金は、表 3-13 で示した季節時間帯別の料金を採用した。系統の電力排出係数を共通して 0.30kWh/kgCO<sub>2</sub> と置いている。その他のパラメータは表 3-11 に示したものと同一である。

表 4-2 ケース設定

	エネルギーサービス需要	地区内エネルギー転換	二酸化炭素排出削減
1	BAU	導入不可	なし
2		導入可	なし
3		導入可	1 に比較して各時点で 20%減
4	減少 (冷暖房需要 4 割減少、 動力需要 2 割減少)	導入不可	なし
5		導入可	なし
6		導入可	4 に比較して各時点で 20%減

## 4.2. 結果

### 4.2.1. エネルギーサービス需要

推計した世帯類型別の世帯数と、エネルギーサービス需要の推計結果を図 4-10、図 4-12 に示す。2030 年までは上述の想定に従って世帯数が増加する。子供のいる 2 世代や夫婦世帯も増加するが、単身世帯も増加する。2030 年以降の世帯数はほぼ横ばいであるが、単身高齢、高齢夫婦世帯の比率が増加する。

エネルギーサービス需要も、世帯数・人口の変化に伴って変化する。エネルギーサービス需要は、現在と同じサービス要求水準を仮定すれば、2030 年まで増加し、計画人口の 26,000 人を達成した後は、その後緩やかな減少に転じる。

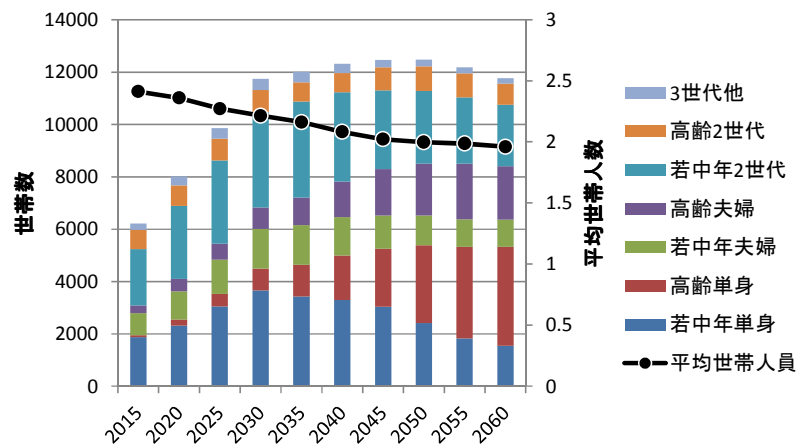


図 4-6 地区に居住する世帯構成の変化

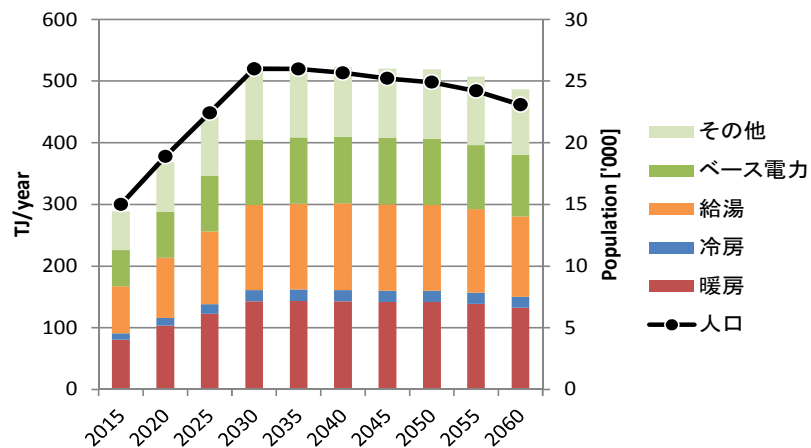


図 4-7 地区における家庭エネルギーサービス需要の変化

移動需要を除く。

ここまでは戸建住宅と集合住宅のエネルギーサービス需要の差は、統計値からは延床面積の違いを排除し難いこと、需要条件を揃えたいことから考慮していなかった。しかし、このとき、系統電力の排出係数を  $0.3\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 、地区内エネルギー転換（地域熱電併給等）を不可とし、さらに移動需要に対応する部分を除いたときの二酸化炭素排出量は年間約 11 万トンとなり、図 4-3 で示されている 2030 年の「従来のまちづくり」における業務部門・家庭部門の二酸化炭素排出量（年間 5.3 万トン）に比較すると絶対量が大幅に大きいという結果になった整合していない。延床面積や原単位の想定の違いなどが原因と考えられる。

このため、以降では表 3-10 に挙げた統計値をもとに、表 4-3 に掲げる値で集合住宅のエネルギーサービス需要を補正し、これについて地区のエネルギー需給の計算を行った。それでも依然として排出量は約 8 万トンと高いレベルにあるが、二酸化炭素排出削減対策を行った際の相対変化の分析においては意味があるものと判断する。

表 4-3 集合住宅のエネルギーサービス需要の補正

エネルギーサービス需要	比
暖房	0.45
冷房	0.85
給湯	0.80
動力	0.75

建物配置を考慮したエネルギーサービス需要の分布を図 4-7 に示す。今後開発が進み世帯の居住が拡大すると想定している、地区の北部において、エネルギーサービス需要の増加がみられる。本地区でのエネルギーサービス需要は地区中心部における業務部門によるものが大部分を占めており、これについては変化しないと想定している。

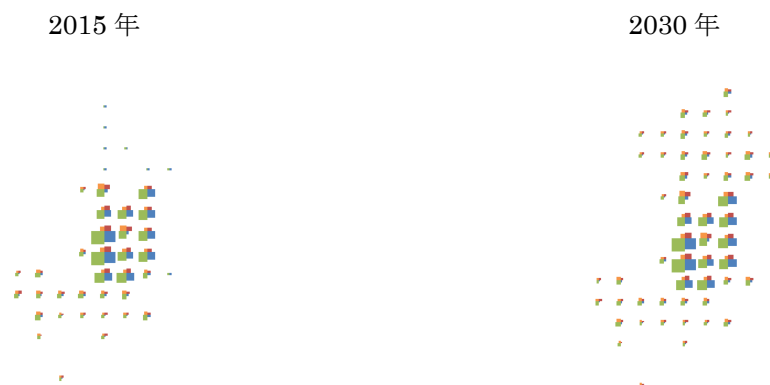


図 4-8 地区におけるエネルギーサービス需要の分布(需要 BAU)

## 4.2.2. 地区のエネルギー供給システム

### (1) エネルギー需給と二酸化炭素排出

6 ケースでのエネルギー購入・受入量、エネルギーサービス需要、二酸化炭素排出量を図 4-9、図 4-10、図 4-11 に示す。また、それぞれのケースにおけるコジェネレーションの配置とエネルギー配送の様子を図 4-12 に示す。

エネルギーサービス需要が減少するときにはコジェネレーションの導入数を減らして熱導管で融通することによるコスト削減効果を得ている。コジェネレーションの導入のみで二酸化炭素排出量はベースライン（地区内エネルギー転換導入不可のケース）比でほぼ 2 割程度減少したため、二酸化炭素排出制約を設けたケースでの差は小さかった。

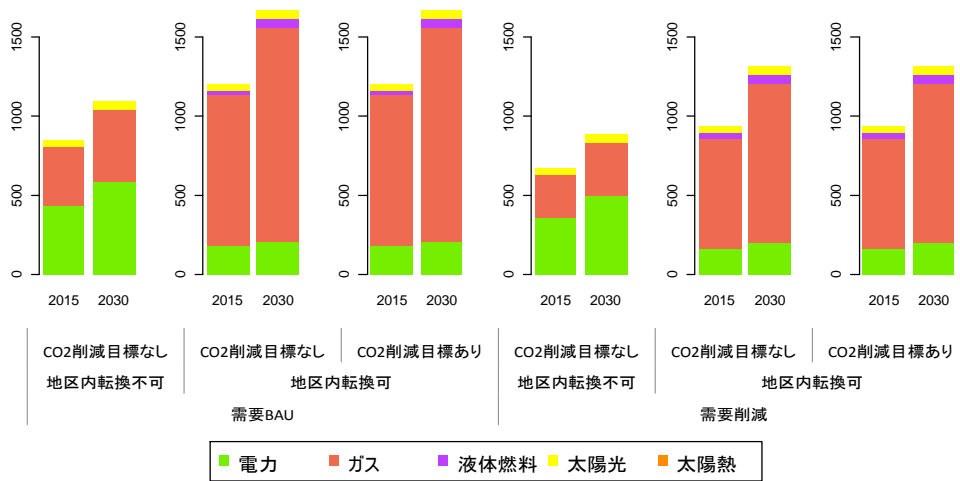


図 4-9 エネルギー購入・受入量[TJ/year]

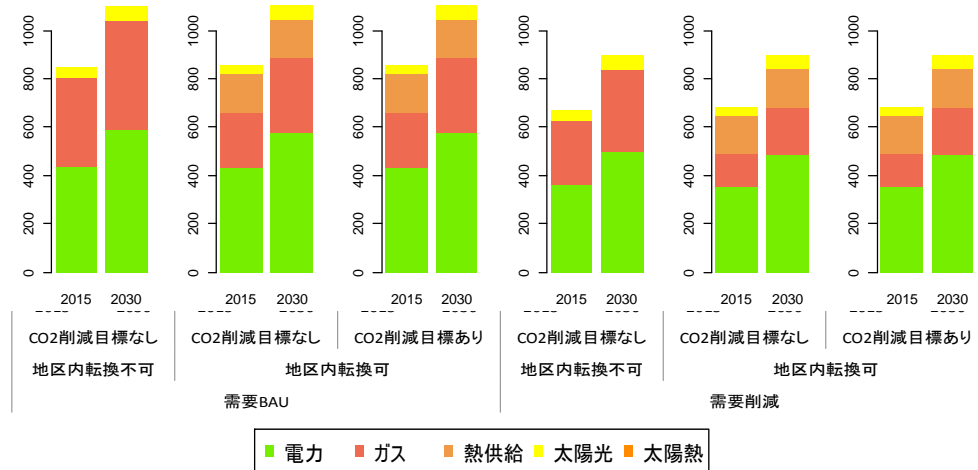


図 4-10 最終エネルギー消費量



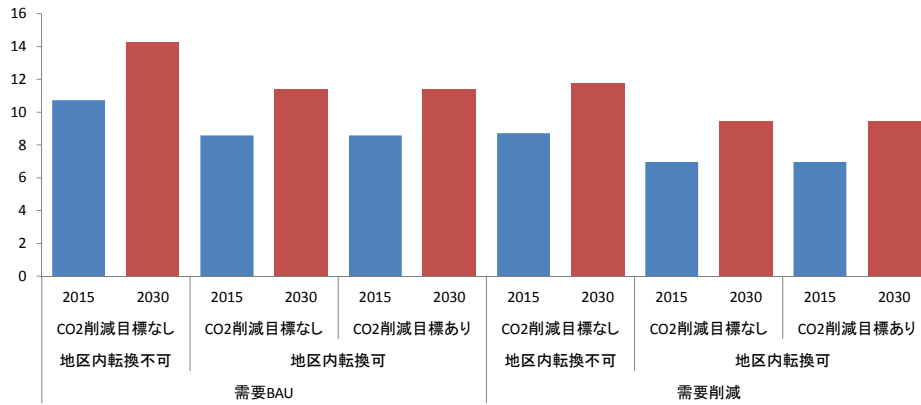


図 4-11 二酸化炭素排出量[万 tCO2/year]

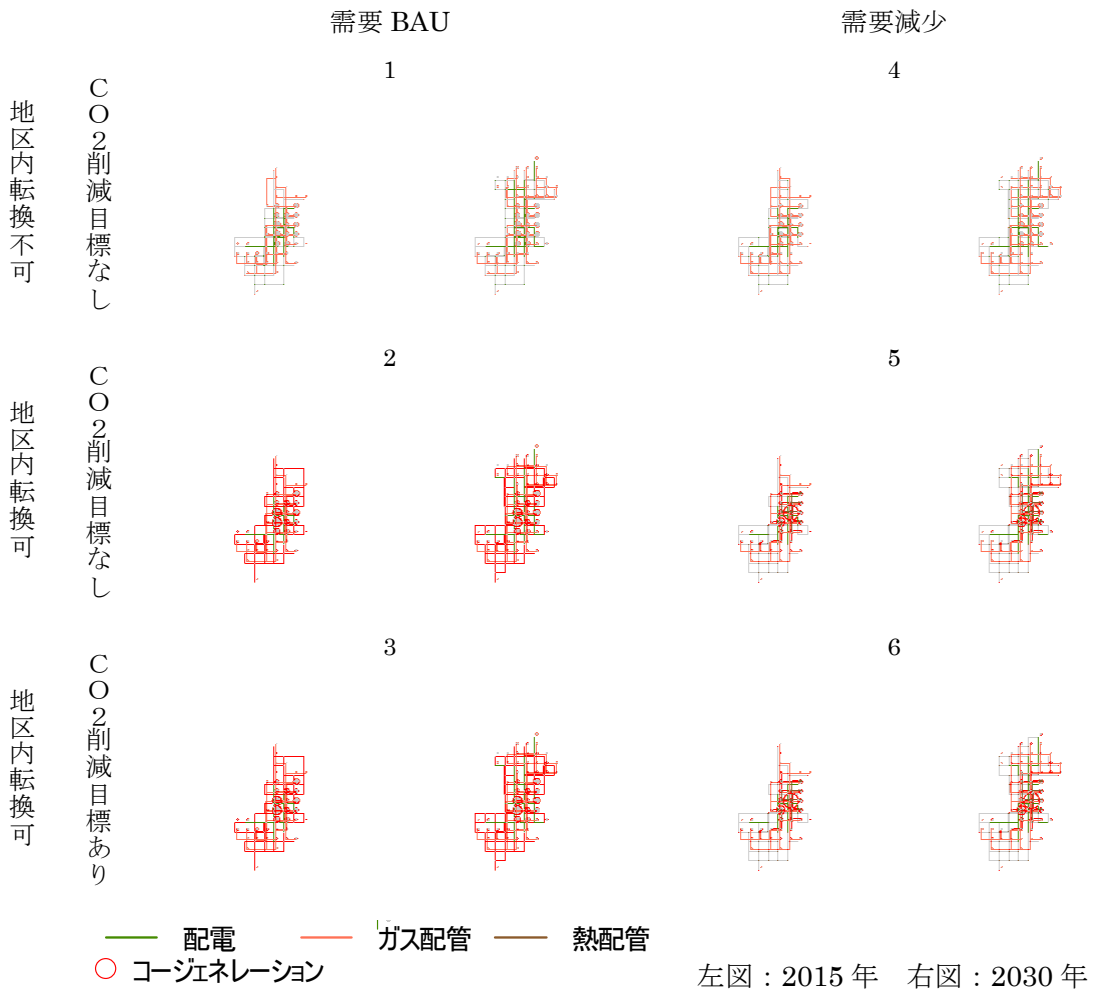


図 4-12 コージェネレーションの配置とエネルギー配送

(2) コスト

この地区のエネルギーサービス充足のために必要な年間コストを図 4-13 に示す。設備費

用は、年経費率を用いて年間支払額に換算している。エネルギーサービス供給量あたりでは、図 4-14 に示すように 4.5～5.3 円/MJ の単価となる。ここでは、エネルギー購入費用のほかにエネルギー配送、エネルギー利用設備のコストも含まれている。

地区内転換可・不可のケースの差は、地区のエネルギー供給事業者が、購入したエネルギーの配送に留まらず、地区内でのエネルギー転換事業を行った際の全体費用削減効果を示している。地区全体の期間平均では、エネルギーサービス単価あたりで約 0.8 円/MJ、総額では 12 億円程度の効果がある。

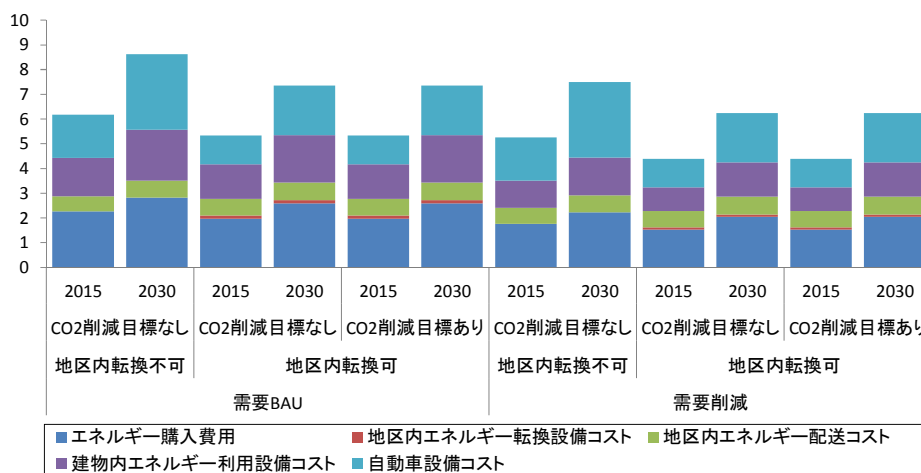


図 4-13 システムコスト[十億円/年]

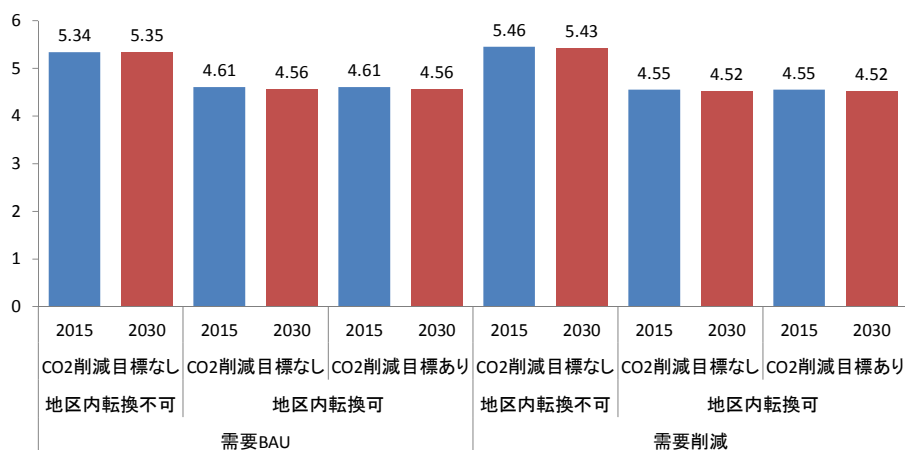


図 4-14 エネルギーサービス供給単価[円/MJ]

## 4.3. 考察

### 4.3.1. 望ましいエネルギー供給システム

本地区では、業務建物面積の比率が大きく、熱需要が冬を含めて一定程度発生する。この需要が今後も一定程度確保できるとすれば、商業低層建物、オフィス等高層建物、中心部に近い沿道市街地においてはコジェネレーションによる熱利用が経済性・環境性（二酸化炭素排出削減）の両面で有効である。数街区程度の範囲での熱融通を行うことで、コジェネレーションのスケールメリットを享受することができる。中心部に近くてもほとんどを住宅用途が占める建物の場合は、熱供給を成り立たせるための十分な熱需要が発生せず、個別空調が依然として有効である。一方で、今後 BEMS など建物省エネルギーにより冷暖房需要が減少することが見込まれる場合には、コジェネレーションの導入数を少なくし、集合住宅向けも含めた熱融通を行っていくことがより経済的である。

また、地区の周辺部、道路距離で 1km 程度だけ離れた程度のところでも、需要が大きく見込めない場合にはガス配管を単独で敷設することは経済的ではなく、電気供給のみを行う、もしくは上下水道等工事と同時敷設を行うことが必要である。

地域熱供給の導入と熱の有効利用は、二酸化炭素の削減にも貢献するため、個別空調をベースラインとして 2 割程度の二酸化炭素排出削減を行う際には、十分な効果を発する。転換側でこのような対策が取れるときは、需要側では、個別機器の省エネ（ここでは明示的に考慮していない）以外では、燃料転換（大幅な電化など）を伴うような対策を選択する必要がない。

ただし、コジェネレーションを導入する場合、電気自動車の効果については検討が必要である。外部から電力を購入する場合であれば、購入した安価な夜間電力を充電できる電気自動車は経済的な選択肢である。しかし、コジェネレーションを導入し、熱による冷暖房や発電した電力を用いた冷暖房を行うのであれば、昼間のピーク電力を抑制できる。このときに電気自動車を夜間充電することは、夜間に別のピークを生み出し、昼間のピーク電力によるコスト削減効果を打ち消す可能性がある。

#### 4.3.2. 望ましいエネルギー供給システムを実現するための方策

ここでは、地区のエネルギー供給を手掛ける事業者の存在を想定している。このような事業者の存在による、地区全体のエネルギー費用の低減とそのメリットの分配方法について、分析を行った。

地区全体のコストが最小となるシステムコストを導入することは、地区から外部へ流出する費用を低減させていることにもなり、地区の経済上でも望ましい。一方で、主体別ではメリットが得られていない可能性がある。特に、エネルギー供給事業者にとっては、投資のためには利益が必要であり、これを地区内での費用のやりとりによって解消することを、今回得た結果を数値例として示す。

図 4-14 で示したように、エネルギー供給事業者の地域熱電併給事業の実施による、需要家にとっての費用変化は、エネルギー購入価格を除くと、建物内エネルギー利用設備コスト、自動車設備コストの変化である。エネルギー供給事業者が行う熱電併給によって、個別空調設備の設置を削減することができるためコスト削減となる。この額は、需要 BAU の場合には 0.10 円/MJ、需要減少の場合には 0.12 円/MJ、総額ではいずれも 1.4 億円であった。なお、自動車についても、地域熱電併給が行われなかったときには電気自動車が導入され、地域熱電併給が行われるときにはガソリン自動車が導入されるという結果になり、需要家にも間接的なメリットが生じている。

表 4-4 エネルギー供給事業者の地域熱電併給事業の実施によるコスト削減

直接の受益者		総額[十億円]		単価[円/MJ]	
		需要 BAU	需要減少	需要 BAU	需要減少
エネルギー供給事業者	エネルギー購入費用	0.254	0.204	0.18	0.17
	地区内エネルギー転換設備コスト	-0.131	-0.094	-0.09	-0.08
	地区内エネルギー配送コスト	-0.051	-0.028	-0.04	-0.02
需要家	建物内エネルギー利用設備コスト	0.141	0.135	0.10	0.12
	自動車設備コスト	0.910	0.910	0.66	0.78
合計		1.123	1.127	0.81	0.96

プラスが削減を示す。

これより、熱電併給に投資したエネルギー供給事業者が、供給料金を変更する際の、エネルギー供給事業者と需要家双方のメリットが損なわれない金額の範囲が定まる。すなわち、供給料金を最大引き下げるとすれば、エネルギー供給事業者の直接負担の減少額（いずれの場合もエネルギー購入費用の削減額は、追加投資分の年経費の増加を上回る）をそのまま需要家に転嫁する金額である。また、需要家にとって生まれた設備コスト負担減分を相殺するところが、供給料金の引き上げの上限である。

この範囲で課金方法を変えたときの、エネルギー供給事業者にとっての地域熱電併給のための追加投資による内部収益率（IRR）<sup>9</sup>の変化を図 4-15 に示す。

公共事業者における投資に必要とされる内部収益率は 4%程度といわれている。この場合は、エネルギー供給事業者が十分な収益率を確保しつつ、需要家も建物内エネルギー利用設備の負担の減少分を含めれば、総合的な負担減のメリットを得られる。ここの需要家のメリットには自動車設備コストの低減（電気自動車の導入が必ずしも必要でなくなることによる）を含めていないが、これを含めると供給価格の引き下げも可能となる。

この結果は、エネルギー購入価格や設備価格によって変化し得るが、地区全体での最適なエネルギーシステムの導入においても、エネルギー供給事業者は十分な収益率が確保でき、かつ需要家にとっても供給価格の引き下げという直接のメリットが得られるような料金設定が可能となる場合もあることを示している。

ただし、これは需要減少のケースにおいても、将来の省エネによって需要が減少することを予め見越している場合である。想定と異なる熱需要の減少は、熱電併給のような投資にとっては大きなリスク要因になり得る。

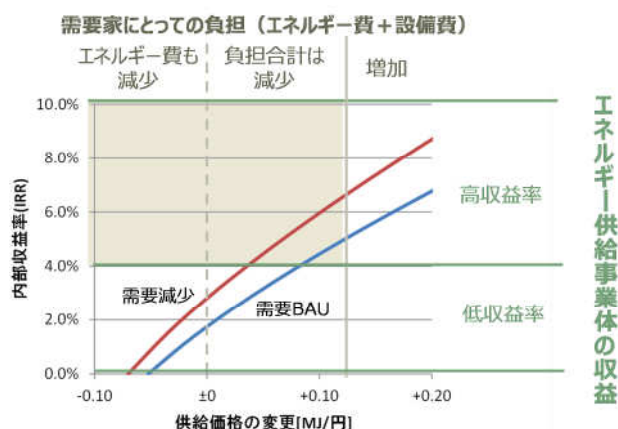


図 4-15 熱電併給によるエネルギー供給価格の変更と事業者にとっての内部収益率

また、本検討では、エネルギー供給事業者の使命はエネルギーサービス需要の充足であるとしているが、現実はその充足方法の違いにより、特に家庭の需要家に対して不公平感が生じる可能性がある。例えば、ガス暖房とエアコン暖房では同じ暖房であっても感じ方が異なる、また、従来のガソリン自動車と新技術の電気自動車では保有者が感じる価値が異なるといった場合である。このような効果の定量評価は困難であるが、地区全体の最適化を図る際には、費用を以て調整する必要がある可能性のある事項のひとつである。

逆に、自動車のような嗜好性の強い製品であっても、例えばガソリンスタンド維持のために行政が費用負担をするほどの事態になれば、ある程度の強制力を以て電気自動車への

<sup>9</sup> 内部収益率（IRR）とは、投資とその収益をある割引率で現在価値換算したとき、その総和がゼロとなるような割引率。投資回収年数が長いほど内部収益率は低くなる。

切り替えを進めることへの意義が広く認められる可能性がある。東日本大震災は、電力供給に対する認識を、需要に合わせて供給されるという理解から、需要側も供給に合わせて消費量を調整すべきものという理解に変えた。同様のことが、将来のエネルギー価格上昇・環境制約の強まり、また高齢化・人口減少に伴う供給事業の継続の困難化によって、消費量の調整に加えて、エネルギー利用設備・機器についても、エネルギー供給側にとっても効率的となるものを選択していくべきという認識に変化する可能性も、十分あり得ると考える。

#### 4.4. 本章のまとめ

本章では、地区のエネルギーサービス需要の長期的変化の推計や、地区に適したエネルギーシステムの検討を、千葉県柏市の実際の地区に適用した。この地区のエネルギー供給を、公的な立場のエネルギー供給事業者が担うとしたときに、望ましいエネルギー供給システムやその費用の分配について、考察を行った。

#### 参考文献

- [108] 千葉県ウェブサイト 柏区画整理事務所  
<http://www.pref.chiba.lg.jp/cs-kashiwa-k/index.html>
- [109] 柏市統計書 <http://www.city.kashiwa.lg.jp/soshiki/020800/p008853.html>
- [110] 三井不動産 柏の葉スマートシティウェブサイト  
<http://www.kashiwanoha-smartcity.com/>

## 5. 結論

### 5.1. 本研究の結論

#### 5.1.1. 本研究のまとめ

##### (1) 背景と目的

温室効果ガス削減の国際的要請や長期的な化石燃料資源価格上昇に加え、日本では、少子化による人口減少、地方都市における中心市街地の衰退などの課題に直面している。地域におけるエネルギー政策やコンパクトなまちづくりが、これらを同時に解決するものとの期待が高まっている。しかし、エネルギーへ着目した解決策がその他の問題に比較してより優れているか、またある解決策がどの程度エネルギー需給を改善するかについての議論はあまりなされていない。

本論文では、人口減少・高齢化下における地域のエネルギー政策が、エネルギー需給の直接の改善、すなわち経済的負担の削減や二酸化炭素排出量の削減に与える効果を示すことを目的とした。地域としては、日本の人口集中地区の多数を占める数キロメートル四方・数万人規模の市街地地区を対象とした。

この上で、以下の二観点からの分析を行った。

一点目は、地区の「エネルギーサービス需要」の人口減少・高齢化の影響を踏まえた上での変化の把握である。地区に着目したとき、人口減少や高齢化の影響がより顕著に表れる可能性があり、また、特定の需要やエネルギー種のみではなく地区全体のエネルギーサービス需要を統合的に検討する必要がある。二点目は、地区内の建物配置の違いによる、望ましい「エネルギー供給方法」(エネルギーシステム)の違いの有無についての把握である。市街地のコンパクトな建物配置が省エネルギー・二酸化炭素排出削減に繋がるといわれているが、エネルギーサービス需要・最終エネルギー消費の関係は、先行研究で多数分析されているところであるが、供給側に着目した分析は少なかった。

##### (2) 用いた手法

地区のエネルギーサービス需要の、人口減少・高齢化の影響を踏まえた上での変化を把握するために、地区内の人口構成の変化がもたらすエネルギーサービス需要変化を推計するためのモデルを構築した。地区の人口変化・世帯構成をシミュレーションした上で、在宅・外出行動を推計し、それに対応するエネルギーサービス需要(暖房、冷房、給湯、動力、移動)を推計するものである。地域の長期的なエネルギーサービス需要変化を、人口・世帯構成に紐付けて推計したこと、住宅内の需要のみでなく移動需要も統合的に推計したことは、既往研究には無かった特徴である。

また、地区内の建物配置の違いによる、望ましいエネルギー供給方法の違いの有無について把握するために、市街地地区のエネルギー需給の評価を行うためのモデルを構築した。

市街地内の物理的建物配置が熱利用や配管敷設に与える影響を直接考慮できる特徴を備えた、地区内エネルギー需給モデルを構築した。また、評価対象とする仮想的な建物配置を生成するための独自の建物配置生成モデルを構築し、これらの建物配置を定量的に示すための建物配置の指標を導入した。既往研究に世界や国を対象としたエネルギー需給モデルはあるが、建物配置を考慮し、また特定の需要やエネルギー種のみでなく、家庭・業務部門全体を取扱い、エネルギー源間の代替を考慮した点が新しい。

### (3) 得られた結果と考察

エネルギーサービス需要変化を推計するためのモデルの構築により、住民の年齢構成変化がエネルギーシステム選択に与える影響が評価可能となった。試算結果によると、特定の世帯に着目したとき、世帯構成員の年齢変化に起因するエネルギーサービス需要の変化は、年間1%程度であった。また、人口減少によりエネルギーサービス需要は減少し、平均的な地区においてもエネルギーサービスの要求水準の増加を伴わなければ、2030年ごろに減少に転じ、特に冷暖房需要の増加は長期的には見込みにくい。

構築した地区のエネルギーサービス需要の長期的変化の推計モデルを用いて、世帯内の加齢に伴う人員構成変化による、住宅からの太陽光発電の余剰電力の発生、家庭用省エネルギー給湯システムの投資回収可能性への影響分析を行った。住宅からの太陽光発電の余剰電力を吸収する需要として、昼間在宅時間の長い世帯では電気自動車、短い世帯では電気給湯器での利用との親和性が高かった。省エネルギー給湯システムは、世帯構成の変化による給湯需要の変化を踏まえると、投資回収が10年を超えるようなシステムではシステムの初期選択時や更新時において、需要の長期変化を考慮する必要が示された。

また、建物配置とエネルギーシステムの分析においては、構築したモデルを仮想的な建物配置に適用し、建物配置別の望ましいエネルギーシステム、長期的な人口変化に即して望ましいエネルギーシステムについて分析を行った。地区内エネルギー需給モデルの挙動の確認を行い、エネルギー技術構成に関する定性的な理解に沿った挙動を行っていること、二酸化炭素排出制約下でのコジェネレーションの選択が系統電力の排出係数によって大きく左右されることを確認した。

次に、建物配置と望ましいエネルギーシステムの関係について分析を行った。熱供給については、今回対象としたような地区の範囲全体で議論する必要はなく、街区単位の熱需要密度が導入を検討する際の十分な目安となっていた。一方で、地区全体の需要分布を勘案することは、インフラコストを削減するという点での効果はあった。人口減少と集約という時間軸の概念を入れた分析では、先行研究で示されている、都市の集約にかかるメリットに比較して、エネルギー購入費節減の寄与は大きくはないことを確認した。一方で、中長期的な人口増減等に伴うエネルギーサービス需要の変化が、熱供給に関するインフラ投資の効率性に影響を与えるため、長期を見据えた計画が必要であることが示された。



これらの分析を、千葉県柏市の実在の市街地地区の状況に適用し、エネルギーサービス需要の推計を行った。また、地区のエネルギー供給を一手に引き受ける事業者の存在を仮定して、望ましいエネルギー供給システム、またそれを実現するための特に費用分担のありかたの検討を行った。

### 5.1.2. 結論

地域のエネルギー政策やエネルギー事業に対する関心は高いが、熱需要が一定程度集中している地域では、エネルギー以外の便益に目を向けなくても、経済性の点から事業が成り立つ可能性がある。地区建物配置を考慮した全体最適なシステムを検討することは、省エネルギー可能性や二酸化炭素排出削減可能性に大きな影響を与えるわけではないが、インフラコスト削減には寄与する。また、地区での全体最適なエネルギーシステムも、エネルギー供給事業者と需要家間の料金の調整によって、双方が明示的なメリットを得られる仕組みも可能性がある。

一方で、地区のエネルギー需給の議論において人口減少・高齢化の影響を考慮すること、その逆に、まちづくりの議論にエネルギー・地球温暖化対策を考慮することの意義には限度がある。前者については、人口減少・世帯構成変化が地区のエネルギー需要に与える影響は、甚大とはいえないものの一つの要因であり、例えば住宅の断熱化の進展による冷暖房需要減少、電気機器の使用増加に伴う動力需要増加と同程度には考慮すべきものであることが判った。後者については、エネルギー配送インフラコストの点からは「まち」の範囲を縮小する意義はあるが、エネルギー供給側の工夫による省エネルギー・温室効果ガス排出量減少の点からは、特定の街区に需要を大幅に集中させない限り、地区の中の建物配置を多少変化させることの効果は小さかった。また、これに伴うエネルギー購入費用の削減は、集約に伴う他のコストに比較すると大きいものではなかった。

## 5.2. 今後の課題と展望

本分析は、関東地方の気候を前提として、利用可能な再生可能・未利用エネルギーが標準的にしか存在しない地区におけるエネルギー需給を評価したものである。このため、暖房需要が大きい寒冷地においては、より広範囲での地域熱供給も経済性を有するなどの結論が得られることも考えられる。また、地域によっては、バイオマス活用、ごみ焼却場や工場の排熱などの利用可能なエネルギーが存在する場合もある。

また、繰り返し述べたように、今回の地区単位のエネルギー需給の分析においては、建物配置の違いによるエネルギーサービス需要の変化は検討対象外としている。具体的には、以下のような効果が考えられる。

- ・ まちなか居住による住民の外出行動・外出手段の変化
- ・ 居住集中による公共交通の成立と外出手段の変化
- ・ ヒートアイランド等の小気候の変化と冷暖房需要の変化
- ・ 集合住宅と戸建住宅の床面積の違いによる各種エネルギーサービス需要の違い（一部では外生的に考慮）
- ・ 集合住宅と戸建住宅の断熱効果の違いによる冷暖房需要の違い（一部では外生的に考慮）
- ・ 空地を利用した再生可能エネルギー、その他未利用エネルギーの利用可能性

これらについては、知見を一般化することで、システム工学的なモデル分析に統合していくことも可能である。

エネルギー価格や技術のコストなどによる感度分析も必要である。特に、既存市街地におけるエネルギーシステム改変については、再開発時などに比較して多額の費用を要する。費用は個別の条件によっても異なるが、感度分析を行うことにより、この点からの知見を深めることには意義がある。

今回対象としたような範囲でのまちづくりにおいては住民の合意と実効性を伴う手法が重要であり、エネルギー需給の面では一定の方向性・目安を示す以上には、まちづくりの議論に貢献できることはあまり大きくはない。一方で、モデル分析は、議論する対象の時間的・空間的バウンダリを明確にするという点で、「地域」のエネルギー政策を巡る議論には不可欠なものである。地方自治体などがそれぞれの状況に合わせてチューニングでき、意思決定の補助として使用できるようなツールへの展開可能性もある。

安倍政権が出生率の目標値を議論したり、人口減少が進んで消滅する自治体の可能性の試算が発表されたりと、人口減少・高齢化問題の深刻性と市民のその問題への認識はますます深まっている。エネルギー・地球温暖化も重要な問題であり、まちづくりの工夫などによりこれらの問題を一举に解決することができれば、確かに理想的である。しかし、人

間の効用に直接関係するライフスタイルや嗜好性を、その間接変数に過ぎない経済やエネルギー問題に対して過小に評価することのないよう、それぞれの問題の優先順位や影響範囲を把握した上で議論していくことが重要である。

## 発表文献

### 原著論文

- (1) 渡邊裕美子, 岩船由美子; 「人口構成の変化を考慮した地域における長期的なエネルギー需要の推計」, エネルギー・資源, Vol. 34, No. 6, (2013).
- (2) 渡邊裕美子, 岩船由美子; 「建物配置を考慮した地区におけるエネルギーシステム導入の長期的評価」, (投稿準備中) .

### 査読付き国際学会

- (3) Yumiko Watanabe ,Yumiko Iwafune, “Method for Evaluating the Relationships between Urban Forms and Energy System”, EnergyCon2014, IEEE International Energy Conference

### 口頭発表

- (4) 渡邊裕美子, 岩船由美子; 地域におけるエネルギーマネジメントの評価モデル構築, エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 31, No.7-2, (2012).
- (5) 渡邊裕美子, 岩船由美子; 最適化モデルによる地域エネルギーマネジメントの価値評価, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 2012, No.155, (2012).
- (6) 渡邊裕美子, 岩船由美子, パーソントリップ調査を用いた将来の交通・民生エネルギーサービス需要予測のための基礎検討, 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, 29, No.26-4, (2013).
- (7) 渡邊裕美子, 岩船由美子, 人の移動と滞在に着目した地域におけるエネルギー需要分析, 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 2013, No.52, (2013).
- (8) 渡邊裕美子, 岩船由美子, 建物配置を考慮した地区におけるエネルギーシステム導入の長期的評価, エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, 33, No.14-2, (2014).

## 謝辞

本論文の作成においてご指導ご鞭撻をいただきました、指導教官の東京大学工学系研究科電気系工学専攻准教授 岩船由美子先生に、心より感謝申し上げます。研究の進捗に始終ご心配をおかけいたしまして、深謝の限りです。

論文審査においては、東京大学工学系研究科 谷口治人特任教授、藤井康正教授、松橋隆治教授、横山明彦教授の各先生の貴重なお時間をいただき、数々のご助言とご指導を賜りました。また、研究発表会などの機会でご意見ご指摘をいただきました、全ての研究者の皆様にも、深く御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、以下の機関の協力をいただきました。エネルギーサービス需要推計モデルの構築部分は、東京大学空間情報科学研究センターの空間データ利用を伴う共同研究（No. 437）による成果であり、「平成 20 年東京都市圏 人の流れデータセット」（CSIS 人の流れプロジェクト事務局提供）を利用しています。エネルギーシステムモデルを構築するにあたっては、パラメータの設定等について東京ガス株式会社の方々よりご助言をいただきました。千葉県柏市を対象としたケーススタディを実施するにあたり、三井不動産株式会社・株式会社日建設計の方々よりデータのご提供をいただきました。また、一連の研究に関し、科学技術振興機構 CREST より助成を受けました。

岩船研究室の皆様、また同専攻の学生の皆様には、研究の内容面のみならず、学生生活面でもさまざまな支援をいただきました。

社会人大学院生としての博士課程進学には、学生時代の恩師である山地憲治先生を始め、諸先輩・友人の皆様、また両親ら家族にも、当初は突然で浅慮な決意であったにも関わらず、力強い応援をいただきました。大学院通学を快く認めていただき、業務調整で多大な配慮をいただきました、株式会社三菱総合研究所 環境・エネルギー研究本部の皆様にも、感謝申し上げます。

皆様の支えなしには本研究を全うすることはできませんでした。再度深謝申し上げます。

2014年8月  
渡邊裕美子