

# 土地利用・交通・エネルギーモデルの展望

山形 与志樹<sup>1</sup>・瀬谷 創<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)  
E-mail: yamagata@nies.go.jp

<sup>2</sup>学生会員 国立環境研究所 地球環境研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)  
E-mail: seya.hajime@nies.go.jp

近年、地球温暖化に対する緩和・適応策など、中長期的な社会の持続可能性を検討するために都市レベルの土地利用シナリオの利用が検討されている。一方、特に昨年の東日本大震災以来、大都市圏における再生可能エネルギーの活用や節電等、リアルタイムに近い現象に関するモデル開発も急務となっている。筆者らは現在、これら中長期的・短期的側面両方の視点から、電気自動車などの本格的な普及も考慮して、交通・エネルギー両方との相互作用を分析できる土地利用モデルに関する検討を行っている。本稿では、地域レベルの電力需要を算出するために現在までに提案されてきたモデルについての分野横断的なレビューを試み、さらに、短期（リアルタイム電力需給）と長期（建物ストックや人口が変化）のモデル化に必要な土地利用・交通・エネルギーモデル開発の方向性について展望する。

**Key Words :** *land use-transportation model, EV, PV, smart grid, energy demand*

## 1. はじめに

地球温暖化に対する緩和・適応策など、中長期的な社会の持続可能性を検討するために、都市レベルの土地利用シナリオが近年用いられ始められている（山形ら, 2011）。一方、特に昨年の東日本大震災以来、大都市圏における再生可能エネルギーの活用や節電等、リアルタイムに近い現象のモデル開発も急務となっている。

筆者らは現在、これら中長期的・短期的側面両方の視点から、電気自動車などの本格的な普及も考慮して、交通・エネルギー両方との相互作用を分析できる新たな土地利用モデルに関する検討を行っている（Yamagata and Seya, 2012）。特に、急速に開発が進んでいるスマートグリッドや、オフィスや家庭への導入が開始したスマートメータから得られる情報を活用し、交通や土地利用との相互作用を分析するためのアプローチに関する検討に取り組んでいる。本稿では、地域レベルの電力需要を算出するために現在までに提案されてきたモデルについての分野横断的なレビューを試み、さらに、短期（リアルタイム電力需給）と長期（建物ストックや人口が変化）のモデル化に必要な土地利用・交通・エネルギーモデル開発の方向性について展望する。

以下、第2章では、スマートグリッドの導入について概観し、第3章では、地域・都市レベルの電力・エネルギー需要予測モデルの開発とリアルタイム予測の可能性について展望する。続いて第4章では、土地利用・交通

モデルのうち特に動学モデルに着目しながらレビューを行い、長期予測の可能性について展望する。最後に第5章において全体のまとめを行う。

## 2. スマートグリッドの導入

再生可能エネルギーによる電力供給は天候や気温に左右されやすく、供給の質や量に関する不確実性が大きい。そのため、導入が進むと大規模な逆潮流など、電力システムに大きな問題が生じてくることが指摘されている（低炭素電力供給システムに関する研究会, 2009）。したがって、太陽光発電（PV）設備やそのための蓄電池の技術開発・普及とともに、それらを制御するシステムの開発が必要になっており、スマートグリッドへの期待が高まっている。

スマートグリッドは、電力会社が大规模発電所の発電量をコントロールするだけでなく、再生可能エネルギーの制御や一般家庭におけるスマートメータを用いた電力の見える化、電気自動車（EV）の充電や家電機器の使用タイミングの設定等をコントロールする仕組みであり（横山, 2010）、米国オバマ大統領が掲げるグリーンニューディール政策をきっかけとして世界的規模で導入が進みつつある。スマートグリッドの我が国における動向については、林(2010)に詳しい。

低炭素電力供給システムに関する研究会 (2009, p.109) の定義によると、スマートグリッドとは「従来からの集

中型電源と送電系統との一体運用に加え、情報通信技術の活用により、太陽光発電などの分散型電源や需要家の情報を統合・活用して、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すもの」とされている。すなわち、スマートグリッドにおいては、電力供給型と需要側との間の双方向通信によって、デマンドレスポンス等の手段によるピークカット、平滑化、省エネルギー化を図ろうとする点が特徴的であり、需要側の電力消費を制御しようとする点が、2008年頃まで我が国でいくつかの実証実験が行われたマイクログリッドとは異なる（横山, 2010, p.147）。すなわち、マイクログリッドとは、小規模な地域内で複数の分散型電源と蓄電池を組み合わせることで電力を高品質に供給するための仕組みである。横山(2010)の整理に従えば、スマートグリッドの構成要素には、①送電ネットワーク・配電ネットワークでの監視・制御システム、②分散型電源の管理、③、④スマートストレージ（蓄電池など）、⑤デマンドレスポンス、⑥スマートアセットマネジメントがあり、マイクログリッドは特に①、②、④に関連が深い技術といえよう。

ここで、地域レベルの電力需要予測に関連する技術としては、特に③のスマートメータが重要である。スマートメータは、通信機能を持ったデジタル電力計量メーターである。さらに、低炭素電力供給システムに関する研究会(2009, p.18)によれば、「単なる電力計の電子化や機能の高度化以外に、それに付随して発生するメーター・事業者間における双方向通信の仕組みや、電力会社における業務改善、顧客サービスの多様化など、スマートメータ導入を契機としたあらゆる仕組みの変革のことを指す」。このような通信機能を利用して電力の見える化を行い、人々の意識・行動変容（省エネルギー行動）を促す実証実験が、研究レベル（八木田・岩船, 2011; Matsui et al., 2012）、実務レベル（関西電力、環境省：平成22年度温室効果ガス排出量「見える化」調査委託業務成果報告書）両方で進められている。

今後、スマートメータによる計測データが世帯、地域、時系列それぞれに関して大規模に収集できれば、リアルタイムに近い形で電力使用状況が把握することが可能になる。

### 3. 電力・エネルギー需要予測モデル

エネルギーの消費部門は大きく、民生（家庭・業務）、産業、運輸に分類される。本稿のレビュー対象は、このうち民生とする。民生部門におけるエネルギー需要モデリングの手法は、大きくトップダウンアプローチとボトムアップアプローチに分類することができる（Swan and Ugursal, 2009; Kavcic et al., 2010）。このうち、トップダウンアプローチは、エネルギー需要全体に着目し、マクロ

要因（GDP等）との関係からエネルギー需要を求めるアプローチであり、住宅タイプ、世帯等の個別の要因は考慮しない。一方、ボトムアップアプローチは、個別の要因の積み重ねによってエネルギー需要を求めるアプローチであり、大きく工学的（engineering）手法と統計的（statistical）手法に分類される。本稿では、トップダウンアプローチについてはSwan and Ugursal (2009)のレビューに譲ることとし、後者のボトムアップアプローチに関連した我が国の研究を対象とすることとする。また、電力供給面の研究についても、簡単な整理を試みる。

#### (1) 工学的アプローチ

##### a) 原単位法

我が国における工学的アプローチを用いた研究は大きく、[A]原単位法を用いたものと、[B]個別機器の使用スケジュールを積み重ねる方法に分類できる。

ここではまず、[A]の原単位法を用いた研究について整理を行う。エネルギー原単位は、（延べ）床面積または世帯を単位とするものが用いられることが多い。民生家庭部門については、エネルギー・経済統計要覧（日本エネルギー経済研究所）によって世帯あたり原単位が毎年公開されている。また、田中ら(2008)は、家計調査の高熱費支出額のデータを用いて、地域（地方）別家族構成別の詳細な民生家庭部門用原単位を推計している。中道・山形(2010)は、同原単位を利用して全国市区町村別のCO<sub>2</sub>排出量のマッピングを試みている。一方、民生業務部門は用途・建物用途が多様であるため、実態把握は困難である。平野ら(2008)は、既往の59の研究について民生業務部門の単位床面積あたり原単位を比較し、推計方法により大きなばらつきがあることを示している。

さて、田中(2008)らのように、地域別の原単位を推計する努力は重要であるが、月別、あるいは時刻別といった時間軸を考慮した原単位が、今後のエネルギー需要予測において重要になりつつある。このような原単位としては、柏木監修(2008)の時刻別月別（24時間×12か月）原単位がある。ここでは、事務所（標準型）、事務所（OA型）、病院、ホテル、店舗、スポーツ施設、住宅ごとに単位床面積あたりの電力負荷、熱負荷（給湯、暖房、冷房）の原単位が掲載されている。加藤ら(2006)は、3次メッシュにおいて建物床面積にこの電力原単位を乗じることで電力需要を計算し、同様に推計したPV設置可能面積にPVシステムの設備容量（0.12kW/m<sup>2</sup>）を乗じることでPVによる電力供給量を推計している。ここで、床面積は、住宅・土地統計調査から得られた建て方別の一世帯あたり床面積（愛知県平均）を、世帯数に乗じることで産出している（しかしながら、世帯当たりの床面積需要量は賃料と反比例すると考えられるため、ここでの仮定は強いものと考えられる）。田村ら(2010)

は、つくば市において同原単位を用いて、PV システム導入の経済性の評価を行っている。その他の実証研究として、谷口・落合 (2011) は、どのような街区でスマート/マイクログリッドを導入すれば最も効果が得られるのかという検証の一環として、電力需要を原単位法で求めている。石田 (2007) は、建築物の運用時のみならず、建築・廃棄時の CO<sub>2</sub> 排出を考慮した環境負荷モデル構築の一環として、尾島俊雄研究室 (1995) の原単位を用いている。

#### b) 積み上げ法

次に、[B] の方法を用いた研究について整理を行う。スマートグリッドにおいては、需要側の管理が重要となることは前述したとおりである。しかしながら、原単位法では、例えば電力の見える化によって誘発された節電行動等を容易にはモデルに取り組みすることはできない。また、EV やプラグインハイブリット、ヒートポンプ給湯等の今後の普及動向によっては、原単位が大きく変わる可能性がある。そこで、個別のエネルギー消費機器の使用量を積み重ねて電力需要を求める方法が必要になると考えられる。この点に関して下田ら (2009) は、「民生家庭部門のエネルギー消費は、世帯を基準として原単位化されることが一般的であるが、世帯あたりエネルギー消費は世帯人員、住宅形式、住宅の広さ、エネルギー消費機器の効率により大きく変わり、また個々の機器の使われ方も世帯人員や生活パターンに依存する」と指摘し、都市・地域内における世帯を世帯人員・世帯構成・住宅形式・住宅規模・住宅熱性能の観点から詳細に類型化し、各類型の世帯に対するエネルギーシミュレーションを積みあげることで都市の民生家計部門エネルギー消費を推計するモデルを提案している。このモデルは、Swan and Ugursal (2009) においてもレビュー対象とされている。

下田ら (2009) では、生活スケジュールを作成するために、NHK 生活時間調査 (NHK 生活文化研究所) の調査結果が用いられている。この調査は、人々の 1 日全体の生活行動を調査することにより、生活の様子やその変化を明らかにするものである。1941 年度に一度、1960 年度より 5 年ごと、秋季に実施されており、最新の調査は、2010 年 10 月 14 日～24 日に行われたものである。ただし、2010 年の調査数は 7200 人であり、2005 年の 12600 人、1990 年の 90240 人と比較して、徐々に調査規模は縮小していることが分かる。

空気調和衛生工学会 (2003) は、1990 年の調査をもとに、生活スケジュールを自動作成するソフトウェア SCHEDULE ver2.1 を構築している。このソフトウェアでは行為者が [1] 勤め人・男、[2] 勤め人・女、[3] 家庭婦人、[4] 高校生、[5] 中学生、[6] 小学生、[7] 70 歳以上・男、[8] 70 歳以上・女に分類され、それぞれの行為者の行為に基づいて、エネルギー需要が推定される。具体的には、

まず行為者別に 1 日の行為率の高い順に行為 (睡眠、食事、仕事、家事、掃除等) を並べ、各行為率の平均時間を積算する。そして、その積算時間量が 24 時間を超えたところまでを、その行為者の 1 日の生活時間として決定する (ながら作業が存在するため、一般に 24 時間を超えるため)。そして、それらを 15 分ごとに割り付ける。これによって、7 タイプそれぞれの、15 分ごとの行為が確定的に決定される。この生活行為モデルに、以下を与えることで、エネルギー需要が推計される。

##### ① 家族構成

##### ② 住宅の部屋構成

##### ③ ある部屋は誰がしようするか

##### ④ ある行為はどこで行われるか

##### ⑤ ある行為はどんな機器を使用しているか

##### ⑥ その機器の熱・湿気・空気汚染物質の発生量

##### ⑦ 行為と関連しない機器の設定

SCHEDULE ver2.1 は、エネルギー消費機器データベースや、属性別生活行為により④～⑦が設定してあり、上記のうち①、②、③を指定することで実行することができる。また、EXCEL の VBA で記述されているため、④～⑦の拡張も容易に可能である。電力の将来予測のためには、例えば、⑦に EV の充電等を加えることが必要になってくるであろう。しかしながら、SCHEDULE ver2.1 は 10 月の調査に基づいているため、冷房・暖房負荷については、別途積み上げる必要がある。生活スケジュールを考慮した積み上げ型の研究に関する同様の試みとしては、日本建築学会 (2002)、西尾・浅野 (2006) がある。また、山口ら (2004) は、オフィスについて同様に積み上げ型のエネルギー需要推計モデルを構築している。

#### c) 床面積のデータソースと将来推計

原単位法においては、床面積ストックのデータをどのように取得するかという点が重要になる。阪田・吉川 (1999) は、我が国においては、建築着工統計等フロー面積に関するデータは存在するが、ストック面積に関してはごく限られたデータしか存在しないと指摘し、最もよい方法は、個別の画地単位か町丁目単位で集計された固定資産課税台帳を閲覧・転記する方法であるが、大量のデータを収集することは極めて困難であるとしている。

このような背景もあり、国土交通省では建築物ストック統計検討会 (国土交通省、2010) において、建築物ストック統計の必要性が議論され、現在『建築物ストック統計』として昭和 25 年以前からの長期にわたる都道府県別のストックデータが推計・公開されるに至っている (諸外国の状況に関して、伊藤ら (2005) は、アメリカ、韓国、中国、フランス、ドイツ、スウェーデン、オーストラリアの建物データの整備状況を比較考察している)。

市区町村単位では、固定資産課税台帳 (自治税務局固定資産税課) の床面積・土地面積データが電子化されて

おり、申請により利用可能である(宮城, 2009)。また、民生家計部門については、住宅土地統計調査(5年毎)において、市区町村別建て方別(一戸建、長屋建、共同住宅、その他)の一世帯あたり床面積が取得できる。

一方、市区町村以下の領域では、固定資産課税台帳のデータは電子化されておらず、利用が難しい。しかしながら、民生家計部門については、国勢調査において、建て方別一世帯あたり床面積が小地域(町丁目程度)単位で統計GISよりダウンロードできる。また、(財)日本建築情報総合センター(JACIC)は、100mメッシュにおける床面積データを整備している。しかしながらこれは、治水経済調査の被害額算出のための基礎資料となることを想定しているため、用途(住居と事業所等)を区別することは難しいと思われる。宮城(2009)は、ゼンリンのZmap TOWNIIの建物ポリゴンを町丁目に集計することで、住宅・商業用途ごとに床面積を算出し、市区町村集計レベルでは固定資産課税台帳データと合致するように配分計算を行っている。

さて、原単位法によるエネルギー需要の将来予測(長期)においては建物床面積の将来予測が必要になる。これに関して、林ら(2000)、大西ら(2009)は、コーホート法による推計を試みている。一方、戸川ら(2010)は、住宅床面積を[人口密度、高齢化率、世帯規模]に回帰し、説明変数の変化から内生的に求める方法を採用している。後者の方法には、シナリオ分析を行いやすいという利点があるといえる。前田ら(2012)は、(a)更新床面積算定モデル、(b)将来床面積需要モデル、(c)用途地域設定モデル、(d)建設床面積算出モデル、(e)床面積配分モデルの5つのモデルを構築し、ハザード関数や更新シナリオ、原単位法等により将来床面積を推計している。柏谷(1988)は、住宅滅失を考慮した立地モデルを構築し、住宅ストックを推計する方法を考案している。

一方、Yamagata and Seya(2012)は、我が国で発展してきた土地利用・交通モデルの一形態である、宮城ら(2010)の建物市場を考慮した応用都市経済(CUE)モデルを東京都市圏町丁目レベルで構築し、床面積を内生的に算出し、原単位法を用いて時間帯別の電力需給のシミュレーションを行っている。土地利用・交通モデルの多くは、土地・建物床面積と同時に、住宅・企業の立地、地代・賃料や交通分布、便益指標を求めることができる。したがって、電力需要推定のために土地利用・交通を援用することが有用になる場合も多いと考えられる。しかしながら、計画停電が時間帯別実施された経験から明らかなように、電力需要変動は動学的であるため時間軸を考慮することが極めて重要であり、土地利用・交通モデルに関しても時間軸を考慮したモデルであることが求められるといえる。第4章では、特にこのようなモデルに着目して土地利用・交通モデルの、特に本稿では土地

利用の部分に着目したレビューを行う。

## (2) 統計的アプローチ

工学的アプローチ、特に原単位法では、気温や季節による需要変動をモデルに取り入れることは容易ではない。一方で、統計的アプローチは、実際に計測された電力需要を、気候要因や世帯数、住宅タイプ等で説明するものである(ただし、説明変数を入れずに、ARIMAモデル等の時系列モデルに基づく場合もある)。

統計的手法については、倉田・森(2007)が代表的手法を要領よくレビューしている。一般に電力需要予測は非線形予測であるため、ニューラルネットワーク(飯坂ら、2004)や、ガウシアンプロセス(クリギング)(近江・森、2006)のような、非線形モデルが翌日電力需要の予測に多く用いられる。一方、翌日だけでなく、リアルタイムに近い予測手法も提案されている。小松ら(2011)は、重回帰モデルにより3時間先電力需要を、河内ら(2003)は、カオス理論に基づき10分先のリアルタイム需要予測を試みている。また、米国の研究例として、Min et al.(2010)は、統計的手法に基づくボトムアップアプローチを用いて、米国の郵便番号レベルの詳細な地域における住居セクターのエネルギー消費量のマッピングを試みている。

統計的手法は様々な説明変数を導入でき、予測精度が高いと指摘される一方で、基本的には観測データが大規模に手に入る場合のみ実行可能であり、従来電力会社や研究者(例えば、目黒ら、1995)以外では適用は困難であった。しかしながら近年、スマートメータの発展によって小規模な研究グループでも独自に電力の計測データを取得することが可能になりつつある。筆者らの研究グループでも、北海道弟子屈町において、試験的な計測を開始している。

しかしながら、プローブデータ同様、スマートメータによる計測を行うにはコストがかかるため、大規模導入は一般には困難である。したがって、統計モデルやシミュレーションモデルを用いた電力需要推計モデルを、観測データを用いて更新するデータ同化(樋口ら、2007; 樋口編、2011)のようなアプローチが今後重要になると考えられる。

## (3) エネルギー供給モデル

本章の最後に、いくつかのエネルギー供給面に着目した研究をまとめることとする。杉原ら(2003)、池田ら(2004)は、数キロメートル四方程度の地域において、コスト、CO<sub>2</sub>排出量、一次エネルギー消費量を評価指標とした都市エネルギーシステムの多目的最適化モデルを構築し、分散型電源導入に関するいくつかの代替案の比較を行っている。加藤ら(2006)、田村ら(2010)は、前述の

ように、PV による電力供給量の推計を試みている。横井ら(2010)は、原単位法をベースとしながら、(a)個別電化システム：ヒートポンプシステムを建物個別に導入し、全熱需要を全電化方式で賄い、太陽光発電の余剰電力は系統電力へ売電、(b)街区内熱融通システム：街区単位で分散型電源と蓄電・蓄熱設備を共有し、太陽光発電の余剰電力と発電排熱の両方を街区内で融通、という2つの案を定量的に比較している。前田ら(2012)は、横井ら(2010)を拡張し、都市計画制度(容積率や用途地域)の違いを考慮可能なモデルとしている。藤本ら(2011)は積み上げ型の民生家計部門電力推計モデルとPVによる供給量推計結果を比較して、余剰電力の経済性に関する分析を試みている。

#### 4. 土地利用・交通モデル

##### (1) 土地利用・交通モデルの歴史

Batty (1979) は、土地利用交通モデルの試みは、1950年代にさかのぼると指摘している。その後、初の実用的(operational)土地利用シミュレーションモデルとして、米国ピッツバーグへの適用のために、ローリーモデル(Lowry, 1964)が開発された。ローリーモデルは、重力モデルに代表される空間的相互作用モデルを基礎とする分かちやすい構造を持ち、その後様々な拡張が行われていった。都市経済学の理論モデルが連続空間を対象とした解析に主眼があったのに対し、ローリーモデルは、離散化された空間である「ゾーン」を分析の対象としている点に特徴がある。なぜなら、人口や従業者数、分布交通量などの空間データの多くはゾーン単位で集計されており、必然的にゾーン単位での分析を余儀なくされるからである。

Putman (1974; 1983) は、ローリーモデルに基づく、初の土地利用交通モデルのソフトウェアパッケージである Integrated Transportation and Land Use Package (ITLUP) を開発した。Iacono et al. (2008) によれば、ITLUP は、米国の何十もの都市に適用され、40 回以上のキャリブレーションが実施されている。Hunt et al. (2005) は、ITLUP が米国で最も用いられているフレームワークであると述べている。ITLUP は、DRAM と呼ばれる世帯配分 (household allocation) サブモデルと、EMPAL と呼ばれる従業者配分 (employment allocation) サブモデルからなる。ITLUP は、サブモデルの修正や視覚化ツールの追加等を経て、METROPILUS と呼ばれる GIS ソフトウェアに拡張されて現在に至っている。Kakaraparthi et al. (2012) は、ITLUP の透明性を高めるために、独自にモデルを MATLAB で記述し直し、ソフトウェア G-LUM として web 上で公開している。土地利用・交通モデルの多くが商用であり、しばしば中身がブラックボックスである点を鑑みれば、

このような試みは非常に重要であるといえよう。その他の空間的相互作用フレームワークのモデルとして代表的なものには、イギリス、リーズを対象に構築された Leeds Integrated Land Use (LILT) モデル (Mackett, 1991) がある。また、ローリー型のモデルは、我が国でも数多くの研究で用いられてきている (例えば、柏谷, 1983; 矢野, 1986; 平田ら, 2006)。これら初期の土地利用モデルの発展については、青山(1984)に詳しい。

ローリー型のモデルは、土地利用・交通モデルの発展に大きく貢献したが、行動論的基礎を持たず(効用ベースの式を用いず)、地代を明示的にモデル化していないため、シナリオ分析において便益計測のための測度が定義できないという経済理論との整合性の点での課題があった。McFadden らによって理論的に発展したランダム効用理論に基づく離散選択モデルは、この理論との整合性の確保において大きな役割を果たし、特に住宅立地を対象として離散選択モデルを適用し、現代都市経済学の理論との整合性を保ちながら、実証的な分析の枠組みを提示した Anas (1982; 1984) は、我が国の土地利用モデルにも大きな影響を与えた。土地利用モデル・交通モデルは、80 年代後半以降、離散選択モデルを取り入れ、都市経済学の理論、あるいは一般均衡理論に基礎を置く方向に発展していった(上田・堤, 1999)。離散選択モデルに基づく均衡モデルとしては、ランダム付け値理論に基づく MUSSA (Martinez, 1996)、RURBAN (宮本, 1989)、投入-算出モデルを基礎とする MEPLAN (Abraham, 2000 参照) 等がある。

ここで、国土交通政策研究所(2002)の分類に従えば、土地利用モデルは大きく統合型フレーム(integrated frame)と、相互作用フレーム(interaction frame)に分類できる(図1)。前者は、目標年(交通基盤整備完了年: 供用年)のみ実行する静学均衡型のモデルであり、立地モデルと交通モデルとが結合されており、主に便益評価を目的としている。一方後者は、基準年から最終年まで段階的に実行し、前期の交通条件が次期の土地利用モデルに入力される(擬似的)動学的なモデルであり、主に都市構造変化の分析を目的としている。一体型に対応するモデルとしては、小池ら(1997)、宮城・澤田(2002)、武藤ら(2000)、山崎・武藤(2008)等を挙げることができる。このうち、前者2つは一般均衡モデル、後者2つの CUE モデルは、多市場部分均衡モデルとなっている。しかしながら、小池・上田(1997)、宮城・澤田(2002)は、データ制約から実データでの検証は行われていない。Anas (1995) は、建物ストック変動を考慮しない短期均衡モデル: NYSIM を構築し、長期均衡モデルは理論的には優れているものの、実際の政策シミュレーションへの適用性は高くないと述べている。我が国で発展した一体型モデルについては、Ueda et al. (2012) に詳しい。

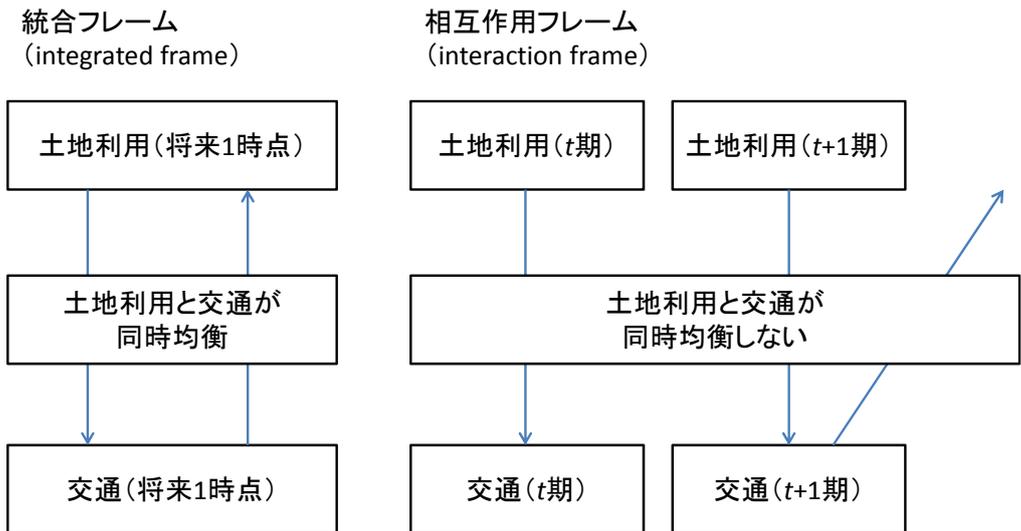


図1：土地利用・交通モデルのフレーム

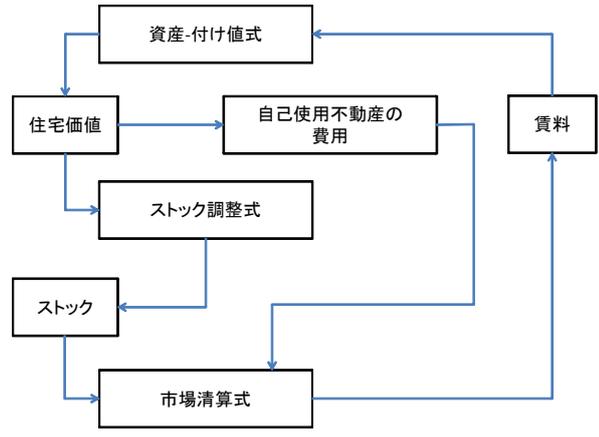


図2：CPHMMのモデル構造

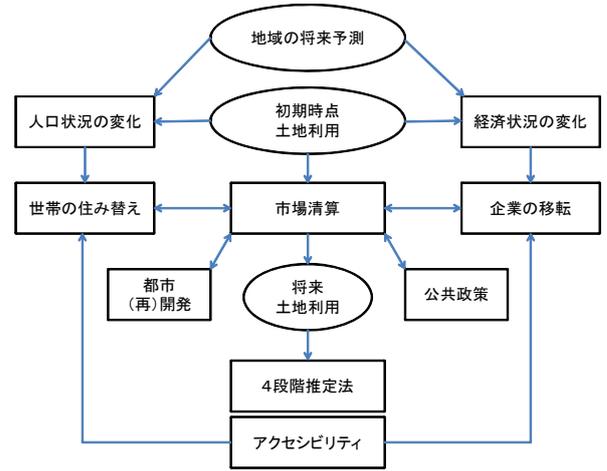


図3：UrbanSimのモデル構造

一方、相互作用フレームに該当するモデルとしては、MEPLAN を適用した西井ら (1995)、および尹ら (2000)、尹 (2002) 等が挙げられる。尹ら (2000) モデルは、時間軸を考慮しており、土地市場において需要と供給が每期均衡する形になっている。しかしながらこのモデルでは、各行動主体は、 $t$  期の入力のみ反応して行動し、時間視野を持って行動するモデルとなっているわけではない。この意味で、準動学的モデルであるといえよう。

さらに 1990 年代以降、行動主体の時間視野を明示的に取り入れた動学的経済モデル (Anas and Amott 1991; 1993; 1994; Martínez and Hurtubia, 2006) や、マイクロシミュレーション (IRPUD: Wegener, 1982; Wegener, 2010; ILUTE: Miller et al., 2004; Miller et al., 2010; UrbanSim: Waddell et al. 2003; Waddell; 2007) が大きく発展してきている。(2) 節では、これらのモデルについて概観する。土地利用交通モデルに関するさらなるレビューについては、Wilson (1998),

古谷 (2003), Timmermans (2003), Hunt et al. (2005), Iacono et al. (2008) 等を参照されたい。

(2) 動学モデルに関するレビュー

前者の均衡モデルの動学化に関して安藤・溝上 (1993) は、「ストック量の変更も考慮する動学的な均衡を考えることも可能ではあるが、その場合には将来に対する予見の問題を避けて通ることは出来ず、予見に関する仮定によって均衡経路は大きく異なることになる」と指摘している。Martínez and Hurtubia (2006) が述べている通り、均衡メカニズムによる価格調整を含む動学土地利用モデルは少なく、前述の Anas and Amott の一連の研究や、Martínez and Hurtubia (2006) 等数える程しかない。Anas and Amott の一連の研究では、住宅への投資家が将来の均衡価格を予測可能、すなわち完全予見 (perfect foresight) であると仮定したモデル化を行っている (ただし、世帯はそ

表 1 : 必要となるデータ (土地利用モデル部分のみ)

	TELUM	CUE(土地市場モデル)	CUE(建物市場モデル)	UrbanSim
空間 解像度	ゾーン	ゾーン	ゾーン	通常 150m×150 グリッド
時間 解像度	静学	静学	静学	動学(/年)
世帯	総人口	総人口	総人口	総世帯数
	人口 (/ゾーン/所得)	人口 (/ゾーン)	人口 (/ゾーン)	世帯(/グリッド/建物/所得 /世帯主年齢/タイプ /自動車保有 等)
企業	総従業員数	総従業員数	総従業者数	総従業者数
	従業員数 (/ゾーン/セクター)	従業員数 (/ゾーン/住宅・業務用途)	従業員数 (/ゾーン/住宅・業務用途)	ゾーン従業者 (/グリッド/建物/セクター)
住宅	土地面積 (/ゾーン/セクター)	土地面積 (/ゾーン/住宅・業務用途)	土地面積 (/ゾーン/住宅・業務用途)	グリッド(/アクセスビリティ /セクター毎の地価・土地利用 割合/空家率 等)
		地代 (/ゾーン/住宅・業務用途)	地代 (/ゾーン/住宅・業務用途)	建物(/グリッド/面積 /修繕費用/築年数 等)
		利用可能土地面積 (/ゾーン/住宅・業務用途)	利用可能土地面積 (/ゾーン/住宅・業務用途)	
			法定容積率 (/ゾーン/住宅・業務用途)	
			賃料 (/ゾーン/住宅・業務用途)	
			資材投入量 (/ゾーン/住宅・業務用途)	
		資材価格 (/ゾーン/住宅・業務用途)		

の期のみ所得, および住宅の賃料・期待自己使用費用・大きさ・質, によって規定される効用を最大化するという意味で近視眼的 (myopic) . 彼らのモデル概要を, 図 2 に示す. 一方 Martínez and Hurtubia (2006) は, ディベロッパーについても近視眼的であると仮定してモデル化を行っている. 我が国では, 文 (1990) がディベロッパーの行動に基づく市街化変化の動学モデルを構築している.

マイクロシミュレーションモデルは操作性が良くモデル構造は理解しやすいが, 均衡がない状況における価格調整に難しさがあり (Irwin, 2010) , 代表的モデルである UrbanSim には, 不動産価格の形成メカニズムと人々の選択行動が乖離している等の課題がある (Anas and Liu, 2007; Felsenstein and Ashbel, 2010; 鈴木ら, 2010) . したがって今後, 金融・不動産経済学の理論を取り入れた, オペレーショナルな動学的均衡モデルの開発が必要になるといえよう.

一方, 後者のマイクロシミュレーションも, 90 年代以降大きく発展してきている. Wegener (2010) は, 既往の気候変動やエネルギー社会への挑戦に, 既往の土地利用・交通モデルは未だ答えられていないとし, 動学的マイクロシミュレーションの必要性を指摘している.

Michael Wegener らの研究グループによって, ドイツのドルトムントを対象に構築された IRPUD は, 都市の衰退 (urban decline) を扱ったモデルとなっており, 交通 (transport) (静学均衡モデル), 加齢 (ageing) (人口, 従業者, 住宅), 公共計画 (public programmes), 民間建設 (private construction), 労働市場 (labour market), 住宅市場 (housing market) という 6 つのサブモデルからなる. IRPUD では, 世帯の移転モデルについて, マイクロシミュレーションが採用されている. 前述のように, 不均衡モデルでは, 賃料や地代の価格調整が難しい. IRPUD では, ゾーンにおける地代の調整を次のように行っている.

$$R_{t+1; z, i} = R_{t; z, i} \left[ 1 + f \left( \frac{V_{t+1; z, i}}{D_{t+1; z, i}} \right) \right], \quad (1)$$

ここで,  $t=1, \dots, T$  は期,  $z=1, \dots, Z$  は住宅タイプ,  $i=1, \dots, I$  はゾーンである. また,  $R$  は地代,  $V$  はゾーンの空き家数,  $D$  はゾーンの住宅数である. すなわち, 地代は均衡する必要はないが, 住宅や空き家の個数を通して需給が反映される仕組みとなっている. IRPUD では,  $f$  として S 字型の成長曲線が用いられている.

一方, 現時点で最も詳細なマイクロシミュレーション

と評価されている ILUTE (トロント大学, Eric J. Miller ら) は, エージェント・ベースシミュレーションである点に特徴がある. 例えば, 不動産市場ではゾーンではなく個々の建物に着目し, 個々の建物に対する需要量に応じて需給が均衡するように価格調整が行われる (Miller et al, 2010). ILUTE は, 生活行動ベースの生活行動モデル (TASHA) や, エージェントベース交通モデル (MATSim) を統合した大規模モデルであり, 近年エネルギーモジュールの追加も試みられている (Chingcuanco and Miller, 2012). しかしながら, エージェントベースモデルとするためには, 大量の非集計化作業が必要である点は, 実用モデルとしては大きな課題であろう.

UrbanSim は, 1990 年代中頃より, ワシントン大学の Paul Waddell らの研究グループによって開発されてきたマイクロシミュレーションである (図 3). 最大の特徴は, オープンソースとして Python で記述されたコードが公開されていることである. また, モデル構造 (付録) がシンプルで分かりやすいことから, 米国では様々な政策検討に用いられている. 宮本 (2008, p.41) によれば, 米国では, ホノルル, ユージーンズプリングフィールド, ソルトレイクシティ, ヒューストン, エルパソ, シアトル, サンフランシスコ, ワシユタノー郡, セントクレア, 米国外では, アムステルダム, パリ, チューリッヒ等, 様々な都市に適用されている.

マイクロシミュレーションでは, 乱数を用いたモンテカルロシミュレーションによって世帯や企業 (UrbanSim では従業者) の立地を決めるため, 乱数の種によって結果が異なるという問題を抱える. したがって, 複数回の試行の平均等が用いられることも多いが, UrbanSim では, Bayesian Melding と呼ばれる一種のモデル平均技術でこの点の改善を試みている (Sevčíková et al., 2007).

UrbanSim は, グリッドセルと呼ばれる 150m×150m グリッドがモデル構築単位とされることが多く, そのグリッドは, 用途ごとの建物を含み, かつ建物は, 世帯・従業者を含む. このように構築には非常に大規模な集計・非集計データが必要であり, データ収集に数年を要するという報告もある. 表 1 は, Duthie et al. (2007), 山崎・武藤 (2008), 宮城ら (2010) をもとに, ITLUP, CUE, UrbanSim で必要となるデータを比較したものであり, UrbanSim が他の集計モデルと比べると極めてデータインテンシブであることが分かるであろう. 通常表 1 に示したようなデータの多くは入手困難なため, アドホックな仮定をおいて構築せざるを得ないのが現実である (Patterson and Bierlaire, 2007; Kakaraparthi and Kockelman, 2011).

しかしながら, 予測力の観点からは集計モデルに勝る可能性が指摘されており (Duthie et al., 2007), 我が国においても構築・比較研究を行う価値はあるといえる.

Patterson et al. (2010) は, 集計データを割り振って作成した非集計データを用いた場合でも, 妥当な予測値が得られる可能性をシミュレーション実験によって示している. したがって, 集計モデルとシミュレーションモデルの短所・長所を正確に認識しながら, 目的に応じた使い分けを行うことが必要であろう.

時系列を考慮した実用的な土地利用モデルの研究は, 我が国では立ち遅れていると考えられる (例えば, 宮本, 2008 参照). Anas and Amott らの動学的均衡モデルでは, 便益計測のための測度 (EV (※ここでは, 等価的偏差の意); CV) を定義することが可能であり, 費用便益分析のために有用であると考えられる. 一方, マイクロシミュレーションは, モデル構造に関する柔軟性があり, 使いやすと考えられる. 今後, 築年数等を考慮した詳細な将来予測のために, 我が国においても, 両者に関する理論・応用適用研究の蓄積が望まれるところである.

## 5. おわりに

本稿では, 地域レベルの電力需要を算出するために現在までに提案されてきたモデルを分野横断的にレビューすることを試みた. まず, 第 3 章では, 我が国で提案されてきた電力エネルギー需要モデルを, 工学的アプローチと統計学アプローチの観点からレビューし, 今後はリアルタイムの需要予測が必要になることを指摘した. 第 4 章では, 長期の電力需要予測において必要な建物ストックや人口の空間分布を求めるモデルとして土地利用・交通モデルに着目し, 特に時間軸を考慮した動学的モデルを中心にレビューを行った.

現時点で, 土地利用・交通モデルとエネルギーモデルを統合するような動きは, その重要性に反してほとんど見られない. 本稿では, 交通モデルに関するレビューは対象外としているが, 今後の電気自動車の普及を考えると, 地域レベルの電力需要について考える上では, 動的な交通モデルの連結は不可避であるといえる.

今後, 上述したような研究をもとに, 土地利用・交通・エネルギーを統合したモデルの開発を行っていく予定であり, その概要については別の機会に発表したい.

### 付録 UrbanSim model (Waddell et al. 2003) の構造

UrbanSim は,

- ①交通モデル (transport model)
- ②経済推移モデル (economic transition model)
- ③世帯推移モデル (demographic transition model)
- ④従業者・世帯転居モデル (employment and housing mobility model)
- ⑤従業者・世帯立地選択モデル (employment and housing location choice model)

⑥ 不動産開発・地価モデル (real estate development and land price model) で構成される。

まず、次の記号を定義する。

期	: $t=1, \dots, T$
グリッドセル (ゾーン)	: $i=1, \dots, I$
$t$ 期の総従業者数	: $E_t$
$t$ 期の総世帯数	: $N_t$
セクタータイプ	: $k=1, \dots, K$
世帯タイプ:	: $h=1, \dots, H$
個々の従業者 $s \in k$	: $s_k=1, \dots, S_k$
個々の世帯 $r \in h$	: $r_h=1, \dots, R_h$
住宅地価	: $P_{re}$
商業地価	: $P_{co}$

① 交通モデル

UrbanSimでは、交通モデルは外生であり、数年おきに実行され、アクセシビリティ指標が計算される (図3)。我が国では、データとしてパーソントリップ調査を用いるのであれば、10年に一度 (その間は一定) とせざるを得ないと考えられる。

② 経済推移モデル

雇用 (従業者)  $E_t$  は、通常10~20のセクターに分類される ( $E_{t,k}$ )。1年ごとの各セクターの総数は、外生的に与える。したがって  $E_{t+1,k}$  は、別途マクロ計量モデルを構築するか、シナリオによって与える必要がある。セクター毎の増加した総従業者数: ( $E_{t+1,k} - E_{t,k} > 0$ ) は、⑤の従業者立地選択モデルで配分される。減少したセクター ( $E_{t+1,k} - E_{t,k} < 0$ ) については、減少数を現状の空間分布に従う形で配分する。

③ 世帯推移モデル

世帯タイプ ( $h$ : 世帯主の年齢, 所得, 世帯規模等) ごときの総世帯数  $N_{t,h}$  の将来予測値  $N_{t+1,h}$  は、外生的に与える。②と同様、タイプ毎に、増加した総世帯数 ( $N_{t+1,h} - N_{t,h} > 0$ ) は、⑤の世帯立地選択モデルで配分され、減少した世帯タイプ ( $N_{t+1,h} - N_{t,h} < 0$ ) については、減少数を現状の空間分布に従う形で配分する。

④ 従業者・世帯転居モデル

現時点のUrbanSimでは、移転を企業でなく、従業者 (雇用) 単位で詳細にとらえる。したがって本転居モデ

ルでは、従業者や世帯の転居の意思決定 (移動するorしない) をモデル化することとなる。また、ここでは、マイクロシミュレーションが用いられている (したがって、乱数の種によって結果は異なる)。

今、従業者と世帯が  $t+1$ 期期首までに転居することによる効用が、それぞれ  $V_{t+1,k}$ ,  $V_{t+1,h}$  と与えられるとする。このとき、それぞれが転居する確率  $p$  は二項ロジットモデルを用いて、次式のように表すことができる。

$$p_{t+1,k} = 1 / \{1 + \exp(V_{t+1,k})\}; p_{t+1,h} = 1 / \{1 + \exp(V_{t+1,h})\}. \quad (2)$$

転居の効用は、従業者モデルでは、[セクタータイプ, セクターの規模]を説明変数とする線形式、世帯モデルでは、[世帯主の年齢, 子供の有無, 所得, 世帯規模]を説明変数とする線形式として特定化されることが多い。

一般に集計モデルでは、 $p$  に  $N_h$  や  $E_k$  を乗じることで、転居数を求めるが、UrbanSimはマイクロシミュレーションであるため、個々の世帯  $r \in h$ ,  $s \in k$  ごとに乱数を発生させ、(2) 式の確率と比較することで、移転の判定を行う。

⑤ 立地選択モデル

②, ③で求められる従業者や世帯の増加分と、④で求められる転居者を、150m×150mのグリッドに配分する。従業者が立地可能なグリッドは、グリッドの中の非従業用床面積と、従業者あたりの床面積によって決まる (世帯も同様であるが、床が住宅用)。無論、在宅ワーク, 自営業等を考えて、従業者を一定割合、住宅用床に配分することも可能である。UrbanSimでは、短期的 (年内) には、住宅ストックが固定されたものと考え、立地者はプライステイカーと考える。従って、後に述べるディベロッパーの供給との相互作用で地価が決まる構造とはなっていない (Felsenstein and Ashbel, 2010は、この点の改善を試みている)。立地選択 (配分) は、多項ロジットモデルを用いて行われ、説明変数としては、[地価, アクセシビリティ, 集積の指標等]が導入される。④と同様、各グリッドの立地確率に基づいて、立地グリッドがマイクロシミュレーションで決定される。

⑥ 不動産開発 (ディベロッパー) ・地価モデル

不動産開発モデルの構造は、⑤のモデルと同様多項ロジットモデルである。ディベロッパーは、グリッドの特性を説明変数として、開発の種別ごとに、開発するグリッドをマイクロシミュレーションで決定する。また、グリッド  $i$  の地価は次式を用いて更新される (住宅用のケース)。

$$P_{re,i,t+1} = \alpha + x'_{i,t+1} \beta + \delta \left( \frac{\chi_i^s - \chi_{i,t+1}^c}{\chi_i^s} \right), \quad (3)$$

ただし、 $\alpha$ は定数項、 $\beta$ はパラメータベクトル、 $\delta$ はパラメータ、 $x_{i,t+1}$ は $t+1$ 期における説明変数ベクトル、 $\chi_i^s$ は長期における構造的空室率（外生）、 $\chi_{i,t+1}^c$ は $t+1$ 期における空室率であり、立地選択モデル、不動産開発モデルにより調整される。

## 謝辞

本研究は、文部科学省の気候変動適応戦略イニシアチブプロジェクトの助成を受けて実施したものである。

## 参考文献

- 1) 青山吉隆: 土地利用モデルの歴史と概念, 土木学会論文集, 347/IV-1, 19-28, 1984.
- 2) 安藤朝夫, 溝上章志: 土木計画学における均衡概念と応用一般均衡 (AGE) 分析, 土木計画学研究・論文集, 11, 29-40, 1993.
- 3) 尹鍾進: 環境を考慮した土地利用・交通相互作用モデルによる道路交通政策の評価, 京都大学学位論文, 2002.
- 4) 尹鍾進, 青山吉隆, 中川大, 松中亮治: 立地変動を考慮した実用的な土地利用・交通モデルの構築, 土木計画学研究・論文集, 17, 247-256, 2000.
- 5) 飯坂達也, 松井哲郎, 福山良和: 構造化ニューラルネットワークの新しい学習法と最大電力需要予測への適用, 電気学会論文誌 B, 124 (3), 347-354, 2004.
- 6) 池田和俊, 杉原英治, 辻毅一郎: 電源構成を考慮した総合エネルギーサービスシステム導入による CO<sub>2</sub>削減ポテンシャル, 電気学会論文誌 B, 124 (8), 1049-1058, 2004.
- 7) 石田武志: 建設・運用・廃棄時を考慮した業務建物の環境負荷評価モデルの構築, 土木学会論文集 G, 63 (4), 366-375, 2007.
- 8) 伊藤徹哉, 寺木彰浩, 阪田知彦: 建築物の現況データ整備に関する海外事例調査, 都市計画報告集, 4 (3), 51-56, 2005.
- 9) 上田孝行, 堤盛人: わが国における近年の土地利用モデルに関する統合フレームについて, 土木学会論文集, 625/IV-44, 65-78, 1999.
- 10) 近江正太郎, 森啓之: ガウシアンプロセスによる不確定性を表現した短期電力負荷予測, 電気学会論文誌 B, 126 (2), 202-208, 2006.
- 11) 大西暁生, 谷川寛樹, 井村秀文, 高平洋祐: 低炭素都市実現に向けたシミュレータの開発—名古屋市の民生部門を対象として—, 都市計画報告集, 8, 84-87, 2009.
- 12) 尾島俊雄研究室: 建築の光熱水原単位 (東京版), 早大出版, 1995.
- 13) 柏谷増男: 長期間データを用いた土地利用モデル, 地域学研究, 13, 25-43, 1983.
- 14) 柏谷増男: 滅失を考慮した住宅立地モデル, 土木計画学研究・論文集, 6, 61-68, 1988.
- 15) 加藤丈佳, 杉本寛幸, 鈴置保雄: 地域メッシュ統計を用いた地域の電力需要および分散型電源賦存量の算定に関する一検討, 電気学会論文誌 B, 126 (10), 1049-1057, 2006.
- 16) 河内清次, 杉原弘章, 佐々木博司: カオス理論に基づく短時間電力需要予測法の開発, 電気学会論文誌 B, 123 (5), 646-65, 2003.
- 17) 環境省: 温室効果ガス排出量削減シナリオ策定調査報告書, 2001.
- 18) 空気調和衛生工学会・住宅用エネルギーシミュレーション小委員会: 生活スケジュール自動生成プログラム, SCHEDULE Ver.2.1 マニュアル, 2003.
- 19) 倉田栄太郎, 森啓之: Informative vector machine を用いた短期電力負荷予測, 電気学会論文誌 B, 127 (4), 566-572, 2007.
- 20) 小池淳司, 上田孝行, 小森俊文: ミクロ行動理論に基づく交通—立地モデルの開発, 土木計画学研究・論文集, 14, 259-267, 1997.
- 21) 国土交通省: 建築物ストック統計検討会報告書, 2010.
- 22) 国土交通政策研究所: 環境負荷の少ない都市・国土構造に関する研究, 国土交通政策研究第 14 号, 2002.
- 23) 小松秀徳, 所健一, 篠原靖志, 井上俊雄, 野見山史敏, 井手敏郎: 3 時間先電力需要予測手法, オペレーションズ・リサーチ, 56 (9), 530-534, 2011.
- 24) 阪田知彦, 吉川徹: 事業所系床の基準地域メッシュ内現況面積の推定方法の一提案と最大容量推計: 東京都地図情報システム土地・建物データを用いたケーススタディー, 地理情報システム学会講演論文集, 8, 73-78, 1999.
- 25) 下田吉之, 山口幸男, 岡村朋, 谷口綾子, 山口容平: 家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測, エネルギー・資源, 30 (3), 1-9, 2009.
- 26) 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, 123 (2), 151-161, 2003.
- 27) 鈴木温, 北詰恵一, 宮本和明: マッチングモデルを用いた住宅市場のマイクロシミュレーション, 土木計画学研究・講演集, 41, CD-ROM, 2010.
- 28) 田中昭雄, 久保隆太郎, 中上英俊, 石原修: 世帯属性を考慮した住宅用エネルギー消費原単位の推定と将来予測, 日本建築学会環境系論文集, 73 (628), 823-830, 2008.

- 29) 谷口守, 落合淳太: 技術革新が街区ごとのスマートグリッド導入適性へ及ぼす影響, 土木計画学研究・講演集, 44, CD-ROM, 2011.
- 30) 田村聡, 内山洋司, 岡島敬一: 太陽光発電の普及による地域電力負荷および経済性の分析—つくば市におけるケーススタディー, 社会経済研究, 58, 15-25, 2010.
- 31) 低炭素電力供給システムに関する研究会: 低炭素電力供給システムの構築に向けて, 2009.
- 32) 傳田篤: マイクログリッドとは, 日本ガスタービン学会誌, 37(6), 356-364, 2009.
- 33) 戸川卓哉, 小瀬木祐二, 鈴木祐大, 加藤博和, 林良嗣: 環境・経済・社会のトリプル・ボトムラインに基づく都市持続性評価システム, 土木計画学研究・講演集, 41, CD-ROM, 2010.
- 34) 中道久美子, 山形与志樹: 直接及び間接排出量に着目した全国市区町村別全部門 CO<sub>2</sub> の分布特性・要因把握の基礎分析, 土木計画学研究・講演集, 42, CD-ROM, 2010.
- 35) 西尾健一郎, 浅野浩志: 世帯の多様性を考慮した家庭部門エネルギー需要生成ツールの開発, 電力中央研究所 研究報告書, Y05008, 2006.
- 36) 日本建築学会: 住宅内のエネルギー消費に関する全国的調査研究報告書, 2002.
- 37) 林泰弘: スマートグリッドの国内動向, 低温工学, 45(9), 410-416, 2010.
- 38) 林良嗣, 加藤博和, 北野恭央, 喜代永さち子: 都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル評価システム, 土木学会環境システム研究論文集, 28, 55-62, 2000.
- 39) 樋口知之編: データ同化入門, 朝倉書店, 2011.
- 40) 樋口知之, 照井伸彦, 井元清哉, 北川源四郎, 石井信: 統計数理は隠された未来をあらわにする—ベイジアンモデリングによる実世界イノベーション, 東京電機大学出版局, 2007.
- 41) 平田晋一, 谷口守, 松中亮治: 戦略的都市放棄 (アーバントリアージ) に関する試論—減少都市のパターン分析—, 土木計画学研究・講演集, 33, CD-ROM, 2006.
- 42) 平野勇二郎, 外岡豊, 伊香賀俊治, 亀卦川幸浩, 藤沼康実, 下田吉之: 民生業務部門エネルギー消費原単位に関する各種資料の比較評価, 日本建築学会環境系論文集, 73(633), 1331-1339, 2008.
- 43) 藤本卓也, 山口容平, 岡村朋, 下田吉之: 余剰電力固定価格買取・全量買取のもとでの太陽光発電の経済性比較と普及影響評価, エネルギー・資源, 32(3), 1-8, 2011.
- 44) 古谷知之: 土地利用モデルのレビュー, (財) 道路経済研究所, 総合的な交通政策・計画の分析評価手法とモデルの展開, 道経研シリーズ, A-107, 第5章, 75-122, 2003.
- 45) 前田秀人, 中久保豊彦, 東海明宏: 低炭素都市の実現に向けた都市計画と省エネルギー計画の統合マネジメントモデルの開発, 土木学会論文集 G, 68(1), 21-38, 2012.
- 46) 宮城卓也: 開発者行動を考慮した応用都市経済モデルの実用化に関する研究, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文, 2009.
- 47) 宮城卓也, 堤盛人, 山崎清: 開発者行動を考慮した応用都市経済モデルの可能性, 土木計画学研究・講演集, 41, CD-ROM, 2010.
- 48) 宮城俊彦, 澤田理: 交通戦略による都市発展過程のシミュレーション分析: 土地利用・交通統合モデルの応用 岐阜大学地域科学部研究報告, 11, 53-66, 2002.
- 49) 宮本和明: ランダム効用および付け値分析に基づく土地利用モデルの札幌都市圏における適用, 土木計画学研究・講演集, 12, 675-680, 1989.
- 50) 宮本和明: 世界における実用都市モデルの実態調査とその理論・機能と適用対象の体系化, 平成18~平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(c)) 研究成果報告書, 2008.
- 51) 武藤慎一, 秋山孝正, 高木朗義: 空間的構造変化を考慮した都市環状道路整備の便益評価, 交通学研究/2000年研究報告年報, 44, 205-214, 2000.
- 52) 文世一: デベロッパーの行動にもとづいた市街地変化モデル, 土木計画学研究・論文集, 8, 129-136, 1990.
- 53) 目黒公郎, 副島紀代, 山崎文雄, 片山恒雄: 電力需要特性から見た都市の地域分類, 土木学会論文集, 507I-30, 255-263, 1995.
- 54) 八木田克英・岩船由美子: 家庭用エネルギー診断によるエネルギー消費の見える化とその効果, エネルギー・資源, 32(4), 25-33, 2011.
- 55) 矢野桂司: 修正 Lowry モデルによる豊田市域の都市内部システムの分析, 地理学評論, 59(9), 523-546, 1986.
- 56) 山形与志樹, 瀬谷創, 中道久美子: 土地利用モデルを用いた東京都市圏の土地利用シナリオ分析, 環境科学会誌, 24(3), 169-179, 2011.
- 57) 山口容平, 下田吉之, 水野稔: 居住者の行動を基準としたオフィスビルの熱・電力需要シミュレーションモデルの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, 93, 37-47, 2004.
- 58) 山崎清, 武藤慎一: 開発・誘発交通を考慮した道路整備効果の分析, 運輸政策研究, 11(2), 14-25, 2008.
- 59) 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, 66(1), 17-34, 2010.

- 60) 横山明彦: スマートグリッド, 社団法人日本電気協会新聞部, 2010.
- 61) Abraham, J.E.: Parameter estimation in urban models: Theory and application to a land use transport interaction model of the Sacramento, California Region, Dissertation, Calgary, Alberta, 2000.
- 62) Anas, A.: *Residential Location Markets and Urban Transportation: Economic Theory, Econometrics and Policy Analysis with Discrete Choice Models*, Academic Press Inc, London, 1982.
- 63) Anas, A.: Discrete choice theory and the general equilibrium of employment, housing, and travel networks in a Lowry-type model of the urban economy, *Environment and Planning A*, 16 (11), 1489–1502, 1984.
- 64) Anas, A.: Capitalization of urban travel improvements into residential and commercial real estate: simulations with a unified model of housing, travel mode and shopping choices, *Journal of Regional Science*, 35 (3), 351–375, 1995.
- 65) Anas, A., and Amott, R.J.: Dynamic housing market equilibrium with taste heterogeneity, idiosyncratic perfect foresight and stock conversions, *Journal of Housing Economics*, 1 (1), 2–32, 1991.
- 66) Anas, A., and Amott, R.J.: Development and testing of the Chicago prototype housing market model, *Journal of Housing Research*, 4 (1), 73–129, 1993.
- 67) Anas, A., and Amott, R.J.: The Chicago prototype housing market model with tenure choice and its policy applications, *Journal of Housing Research*, 5 (1), 23–90, 1994.
- 68) Anas, A., and Liu, Y.: A regional economy, land use and transportation model (RELU-TRAN): Formulation, algorithm design, and testing, *Journal of Regional Science*, 47 (3), 415–455, 2007.
- 69) Batty, M.: Progress, success, and failure in urban modeling, *Environment and Planning A*, 11 (8), 863–878, 1979.
- 70) Chingcuanco, F., and Miller, E.J.: A microsimulation model of urban energy use: Modelling residential space heating demand in ILUTE, *Computers, Environment and Urban Systems*, 36 (2), 186–194, 2012.
- 71) Duthie, J., Kockelman, K., Valsaraj, V., and Zhou, B.B.: Applications of integrated models of land use and transport: A comparison of ITLUP and UrbanSim land use models, presented at the 54th North American Meetings of the Regional Science Association International, Savannah, Georgia, 2007.
- 72) Felsenstein, D., and Ashbel, E.: Simultaneous modeling of developer behavior and land prices in urbanism, *The Journal of Transport and Land Use*, 3 (2), 107–127, 2010.
- 73) Hunt, J.D., Kriger, D.S., and Miller, E.J.: Current operational urban land-use-transport modelling frameworks: A review, *Transport Reviews*, 25 (3), 329–376, 2005.
- 74) Iacono, M., Levinson, D., and El-Geneidy, A.: Models of transportation and land use change: A guide to the territory, *Journal of Planning Literature*, 22 (4), 323–340, 2008.
- 75) Irwin, E.G.: New directions for urban economic models of land use change: Incorporating spatial dynamics and heterogeneity, *Journal of Regional Science*, 50 (1), 65–91, 2010.
- 76) Kakaraparthi, S.K., and Kockelman, K.M.: Application of UrbanSim to the Austin, Texas, region: Integrated-model forecasts for the year 2030, *Journal of Urban Planning and Development*, 137 (3), 238–247, 2011.
- 77) Kakaraparthi, S.K., Tirumalachetty, S., Kockelman, K.M., Duthie, J., Paul, B., Valsaraj, V., and Zhou, B.: Documentation for use of the gravity-based land use model (G-LUM): With and without in-built travel demand model assumptions, online documentation, 2012 (2012年5月3日アクセス; ([http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/G-LUM\\_Website/homepage.htm](http://www.ce.utexas.edu/prof/kockelman/G-LUM_Website/homepage.htm)))
- 78) Kavagic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., and Djurovic-Petrovic, M.: A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, *Building and Environment*, 45 (7), 1683–1679, 2010.
- 79) Lowry, Ira S.: A model of metropolis, Santa Monica, CA, Rand Corporation, 1964.
- 80) Mackett, R.J.: LILT and MEPLAN: a comparative analysis of land-use and transport policies for Leeds, *Transport Reviews*, 11 (2), 131–154, 1991.
- 81) Martínez, F., and Hurtubia, R.: Dynamic model for the simulation of equilibrium states in the land use market, *Networks and Spatial Economics*, 6 (1), 55–73, 2006.
- 82) Martínez, F.: MUSSA: Land use model for Santiago city, *Transportation Research Record*, 1552, 126–134, 1996.
- 83) Matsui, K., Yamagata, Y., Ochiai, H., and Sato, M.: A feasibility study of CO<sub>2</sub> emission evaluation model and real-time metering system in households with EV and PV, presented at the 19th ITS World Congress 2012, Austria, 22–26, October, 2012.
- 84) Miller, E.J., Farooq, B., Chingcuanco, F., and Wang, D.: Microsimulating urban spatial dynamics: Historical validation tests using the ILUTE model system, presented at the Workshop on Urban Dynamics, Marbella, 2010.
- 85) Miller, E.J., Hunt, J.D., Abraham, J.E., and Salvini, P.A.: Microsimulating urban systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28 (1-2), 9–44, 2004.
- 86) Min, J., Hausfather, Z., and Lin, Q.F.: A high-resolution statistical model of residential energy end use characteristics for the United States, *Journal of Industrial Ecology*, 14 (5), 791–807, 2010.
- 87) Patterson, Z., and Bierlaire, M.: An UrbanSim model of Brussels in a short timeline, presented at the Swiss Transport Re-

- search Conference, Monte Verita, September 13, 2007.
- 88) Patterson, Z., Kryvobokov, M., Marchal, F., and Bierlaire, M.: Disaggregate models with aggregate data: Two UrbanSim applications, *Journal of Transport and Land Use*, 3 (2), 5–37, 2010.
  - 89) Sevcíková, H., Raftery, A.E., and Waddell, P.A.: Assessing uncertainty in urban simulations using Bayesian melding, *Transportation Research Part B*, 41 (6), 652–669, 2007.
  - 90) Swan, L.G., and Ugursal, V.I.: Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (8), 1819–1835, 2009.
  - 91) Timmermans, H.: The saga of integrated land use-transport modeling: How many more dreams before we wake up?, Key Note Paper, 10th International Conference on Travel Behavior Research, Lucerne, 10–15, August, 2003.
  - 92) Ueda, T., Tsutsumi, M., Muto, S., and Yamasaki, K.: Unified computable urban economic model, *The Annals of Regional Science*, online first, 2012.
  - 93) Waddell, P., Boming, A., Noth, M., Freier, N., Becke, M., and Ulfarsson, G.: Microsimulation of urban development and location choices: design and implementation of UrbanSim, *Networks and Spatial Economics*, 3 (1), 43–67, 2003.
  - 94) Waddell, P., Ulfarsson, G.F., Franklin, J., and Lobb, J.: Incorporating land use in metropolitan transportation planning, *Transportation Research Part A*, 41 (5), 382–410, 2007.
  - 95) Wegener, M.: Modeling urban decline: A multilevel economic-demographic model for the Dortmund region, *International Regional Science Review*, 7 (2), 217–241, 1982.
  - 96) Wegener, M.: Overview of land use transport models, in Hensher, D.A., Button, K.J., Haynes, K.E., and Stopher, P.R. (Eds.), *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, pp. 127–146, Amsterdam, 2004.
  - 97) Wegener, M.: The IRPUD model, Working Paper 11/01. Dortmund: Spiekermann & Wegener Urban and Regional Research, 2011.
  - 98) Wegener, M.: The future of mobility in cities: Challenges for urban modelling, 12th WCTR, Lisbon, Portugal, 11–15, July, 2010.
  - 99) Wilson, A.G.: Land-use/transport interaction models, past and future, *Journal of Transport Economics and Policy*, 32 (1), 3–26, 1998.
  - 100) Yamagata, Y., and Seya, H.: An integrated modelling for smart city: Toward efficient CO2 management of EV transport using PV system, presented at the 19th ITS World Congress 2012, Austria, 22–26, October, 2012.

(2012. 5. 7 受付)