

マイクロシミュレーション都市モデルの現状と課題*

Present States and Issues regarding Micro-Simulation Land Use Models*

北詰恵一**・杉木直***・ワラメット ヴィチエンサン****・宮本和明*****

By Keiichi KITAZUME**・Nao SUGIKI***・Varameth Vichiensan****・Kazuaki MIYAMOTO*****

1. はじめに

世界的に適用例が豊富に蓄積されてきている実用型土地利用・交通統合モデルにおいて、マイクロシミュレーションの導入が進んでいる¹⁾。例えば、UrbanSimは、アメリカ合衆国各地の他、オランダ、フランス、スイスにおいて、また、ILUTEは、トロント都市圏での適用が報告されている^{2),3)}。その他にも、マイクロシミュレーションを一部導入しているものや、導入の検討のために試行モデルを作成しているものなどがみられる。しかし、日本では、政策立案および検討において、土地利用・交通統合モデルを活用する例はほとんど見られず、ましてや、マイクロシミュレーションの導入は考えられていないといつてよい。マイクロシミュレーションは、都市機能がより詳細化し、複雑化する中で、様々な都市政策の効果・影響をシミュレーションできる有効なツールである。今後、市民を含む多くのステークホルダーが、目に見える形で都市の将来像を見極め、それに基づき議論を進めていく必要があることから、マイクロシミュレーションの導入を、早急に進めて行く必要がある。

本研究は、世界で研究が進む各モデルの開発者にヒアリングを実施し、それを通して得られた最新の状況をもとに、マイクロシミュレーションの現状と課題をとりまとめることを目的とする。その中から、同モデルの開発意義と必要性、および、今後の都市政策における活用の方向性などを提案し、有効な議論に繋げたい。

*キーワード：マイクロシミュレーション、土地利用モデル、比較分析

**正員、博士(工学)、関西大学環境都市工学部都市システム工学科、(大阪府吹田市山手町3-3-35、TEL06-6368-0892、E-mail:kitazume@ipcku.kansai-u.ac.jp)

***正員、修士(工学)、株式会社ドーコン総合計画部、(札幌市厚別区厚別中央1条5-4-1、TEL011-801-1555、E-mail:ns1491@docon.jp)

****博士(工学)、Kasetsart University、(E-mail: fengvmv@ku.ac.th)

*****フェロー、工博、武蔵工業大学環境情報学部環境情報学科、(横浜市都筑区牛久保西3-3-1、TEL045-910-2592、E-mail:miyamoto@yc.musashi-tech.ac.jp)

2. 現状と課題を整理する視点

モデルが実際の都市政策シミュレーションに用いられる点を重要視し、基礎としておく理論だけでなく、システムの操作性やアプリケーションの状況などを含む観点から、マイクロシミュレーション都市モデルの現状と課題を探ることとし、以下の項目により整理した。

a) モデルの概要

理論上の特徴やモデル開発の過程で関係性のある他の類似モデルとの違いなどを概要として整理する。

b) コンピュータシステム

コンピュータシステムとしての特徴や、使用している言語とGIS、およびGUIや可視化のための工夫など、実用面から捉えたシステム上の特徴を整理する。

c) シミュレーションの概要

ゾーン数、エージェントの区分や種類・数、および計算実行期間の間隔や対象年など、計算の精度および詳細さに影響を与える要素をとりあげた。計算時間や並列処理の可否など、実際の使用場面でのパフォーマンスに大きな影響を与えるものもとりあげている。

d) 最近の開発動向

発展途上であるマイクロシミュレーションは、実際の適用を通じて常に改良されている。現場の都市政策のニーズを適切に汲み上げながら、モデルとシステム両面からの開発方向について調べた。

e) モデルのアプリケーション

適用目的およびデータの取得および調整などにかかわるさまざまな問題について、現実の課題を整理した。

f) モデル適用の実際

交通分析以外の適用目的、関係者のモデル概要理解度、モデルの結果に対して関係者がおく信頼度、実用的な適用における需要予測以外の目的、適用によって得られた示唆など、実用上考えられるさまざまな観点からの評価を整理した。

これらの項目は、マイクロシミュレーションという都市政策のシミュレーションツールが、理論的整合性を踏まえつつも、実際の適用を通じて得られる情報をもとに改良され、発展していくことを意識して、とりあげたものである。

3. 都市モデルの各論

(1) UrbanSim

a) モデルの概要

UrbanSimは、アメリカワシントン大学のPaul Waddellらによって実際に適用された代表的なマイクロシミュレーションモデルである⁴⁾。このモデルの理論上の最も重要な特徴は、1年ごとの動学的プロセスを導入していること、重回帰分析による価格モデルを内生化していること、最尤法を用いた離散選択の立地選択モデルを用いていること、ベイズ理論にもとづくキャリブレーションを行うことができることなどである。また、空間的分析単位は非常に柔軟であり、ゾーン、区画、メッシュなどさまざまに選択できる。交通モデルは外部モデルとしてリンクしており、必ずしも統合型土地利用・交通モデルというわけではない。同モデルは、マイクロシミュレーションモデルとしては先駆的であり、他の類似モデルを指摘しにくい。開発者自身も、特に類似モデルを指摘していない。

b) コンピュータシステム

ベースとなるOSは、Windows、Linux、OS Xであればデスクトップコンピュータレベルで使用可能であり、クラスター・コンピュータでも可能とされている。プログラム言語は、Pythonを用い、C、C++、Fortranのライブラリを使用している。Pythonは、Guido van Rossumによって作られたオープンソースのプログラミング言語で、オブジェクト指向スクリプト言語の一種である。特に、欧米で広く普及していると言われている。マイクロシミュレーションに欠かせないGISは、インターフェイスとしてArcGISを用いている。しかしながら、モデルの目的を考えた場合、オープンソースであることが望ましく、そのようなGISシステムをテストしている状況である。また、同様に、具体的な使用場面を考えた場合、Graphical User Interface による政策代替案評価の方法が重要となるが、現段階では、有効なシステムが用意されておらず、インターフェイスとして用いているArcGISを使ったシナリオ構築システムが開発中である。結果の可視化のため、計算指標や表・図・地図を含む出力フォーマットをユーザーが選べるようにフレームワーク指標が開発されている。

c) シミュレーションの概要

マイクロシミュレーションの性質上、どれくらいの詳細な空間分析単位で、どれくらいのエージェント数のモデルが実際に計算可能なかは、モデルのパフォーマンス上、重要な問題となる。UrbanSimの場合、およそ100万のメッシュでのシミュレーションに成功している。先述のように、空間分析単位の柔軟性がひとつの特徴であることから、メッシュよりやや計算が複雑となる区画や

ゾーンでの100万レベルでのシミュレーションのテストも必要となり、現在、実行中である。また、立地主体グループは、住宅部門では、世帯特性に基づいてユーザーが分類した数百の立地主体グループにより計算可能であり、工業部門では、10～15の部門に属する主体グループによる計算が可能である。立地主体エージェントの数は、パリでの導入事例で、約1,100万人となっている。

計算実行間隔は、1年、シミュレーション対象年は、30年以上である。平均シミュレーション時間は、例えば、サンフランシスコの区画レベルのモデルであれば、現在の標準的なデスクトップのパソコンで、1年のシミュレーションにおよそ12分かかる。Beowulf Cluster を使用してテストした結果、複数のコンピュータによる並列計算が可能である。また、計算管理システムは、デスクトップのクラスター・コンピュータへの配分もサポートしている。

d) 最近の開発動向

現在の開発トピックスとしては、非常に多い空間分析単位数であってもその柔軟性を失わないための区画・ゾーンレベルでのモデルの開発があげられる。また、都市の推移をシミュレートする中で重要な役割を果たすものとしてディベロッパーが挙げられるが、彼らの行動原理となる投資の利益評価に基づく行動を表現したモデルの改良が進められている。システム上の開発は、ArcGIS インターフェイスと空間分析単位の柔軟性の向上のための改良があげられる。

e) モデルのアプリケーション

このUrbanSimモデルが、実際の政策検討に用いられた例をあげると、ホノルル（ハワイ州）、ユージーン・スプリングフィールド（オレゴン州）、ソルトレイクシティ（ユタ州）、ヒューストン（テキサス州）、エルパソ（テキサス州）、シアトル（ワシントン州）、サンフランシスコ（カリフォルニア州）、ワシタノー郡（ミシガン州）、セントクレア（ミシガン州）、アムステルダム（オランダ）、パリ（フランス）、チューリッヒ（スイス）など、非常にたくさんの都市にわたる。また、このシステムがオープンソースであることから、それ以外の目的で使用された場合には、開発者自身も把握できていないようである。いずれにしても、アメリカ国内だけでなく、世界の非常に多くの都市で利用されている有効なモデルであることがわかる。

実際の利用にあたっては、データの入手方法やその整合性が問われることになる。UrbanSimの場合、使用するデータは、ほぼ公共の情報源から得られる。具体的には、土地管理データ、国勢調査、事業所統計などで、多くの国および地域では、GISデータとして提供されているものである。なお、これらの異なる情報源からのデータの整合性については、通常とられているような方法

を用いている。すなわち、設置した基準に基づく異常値データの検出や、空間分析単位の違いによってデータが得られないものについての周辺地区からの配分補完等である。ただし、現在は、より頑健性の高い方法で自動的にこれらを行うアルゴリズム構築のテストを行っている。

マイクロシミュレーションモデルでは、多くの前提のもとに繰り返し計算を行うので、その前提と現実データとの整合性を確保する工夫が必要となるが、UrbanSimでは、これについて特別な方法をとっていない。また、基準年における予測値と実際の値との差が発生してしまうことから、実際にはこれを調整する必要がある。このモデルでは、モデルの不確実性をキャリブレーションのためにベイズ理論によるモデルを開発し、用いている。

f) モデル適用の実際

モデルは、実際には、主として交通分析を目的として適用されると考えられるが、土地利用計画などの複合的な目的設定も想定される。UrbanSimにおいても、将来土地利用と交通計画の統合が意図されている。しかし、このような総合的な観点からモデルが利用される場合、その内容は複雑となり、関係者によるモデルの理解度が低下するおそれがある。UrbanSimの場合も、そのユーザーは、モデルに用いている主体行動の概要は理解しているが、それを数学的もしくは統計的に理解しようとはしない。従って、モデルの理論的・定量的部分については、ブラックボックス化しているとみられる。このことから、モデルの結果に対してユーザーがおく信頼度は、そのメカニズムに基づく信頼ではなく、計算された結果に対する一定の信頼にとどまる。モデル結果を、何らかの政策決定の過程に利用するものの、意思決定のための唯一の根拠として使うわけではない。さまざまな周辺情報と合わせて、定性的に総合的な判断を下すことになる。ただ、重要なことは、これらのモデルの結果を、社会厚生を最大化などで示される効率性の向上だけでなく、例えば、効率性と公平性のトレードオフを考慮しなければならぬ複数の政策パッケージの検討などにも利用していることである。マイクロシミュレーションが、必ずしも費用対便益の最大化をベースにしていなかったことから、このような多様な利用の仕方が可能となるといえる。

なお、開発者である Paul Waddell は、モデル適用によって得られた示唆として、交通事業に起因する不動産開発やその価格へのインパクト、および世帯立地や企業立地などによる交通プロジェクトの長期誘発需要効果を考慮することが重要であるということ、改めて指摘している。

UrbanSimは、精力的な開発が進んでおり、また、実際の都市への適用例も多い。日本において、まず、直接的な適用を行って日本特有の問題点を見出し、諸外国での課題と比較することが求められよう。

(2) ILUTE

a) モデルの概要

ILUTEは、カナダトロント大学の Eric J. Miller らのグループが開発しているマイクロシミュレーション型の土地利用・交通統合モデルである⁵⁾。完全なオペレーショナルモデルの完成に向けて開発を進めている。

モデルの特徴としては、エージェントベースのモデルとして開発されていることで、個人、家族あるいは世帯、企業が、明示的なエージェントとして記述されており、特に、世帯モデルでは、個々の世帯構成員が、明確な関係を持って行動している。自動車保有や居住地選択のような長期的視点に基づく意思決定は、ある閾値に達した場合に誘発され、一方で、日常の活動や交通のような短期的視点に基づく意思決定は、長期的視点で決められた範囲内で利用可能な属性に基づいて決定がなされる。

このモデルは、マイクロシミュレーションの性質上、PropolisとMATSIMに類似しており、エージェントベースのものとしては、オランダで開発中のPUMAとよく類似していると考えられる。

b) コンピュータシステム

現在のところ、モデルシステムを確実に実行できるコンピュータシステムはない。現在のモデルは、Windows上で動くようになっており、使用言語は、C++である。どの一般的なGISでも簡単に接続できるように目指されており、インターフェイスとしては、一般によく用いられるArcGISを採用している。視覚化については、汎用的視覚化・アニメーションソフトウェアのHoudiniを使用している。ただし、GUIは、まだ、整っていない。

c) シミュレーションの概要

シミュレーションを行うことができる空間分析単位数は、1,500である。立地主体数は、200万世帯・500万人であり、グループ分けをせずに直接計算している。計算実行間隔は1年であるが、必要に応じて個々の過程は短い時間段階でシミュレートできる。現在のところこのソフトウェアでサポートしている最小限の時間段階は1ヶ月である。シミュレート対象年は、20年後となっている。複数コンピュータ間の並列計算システムは、まだ、構築されていない。

d) 最近の開発動向

モデルの基本的な部分は2003年にできあがっており、実際に適用できるレベルに具体化している段階である。資金不足によって開発が遅れているが、2008年を目処に、適用可能でキャリブレーションも実施したモデルシステムを稼働する予定となっている。

e) モデルのアプリケーション

このモデルは、トロント都市圏で適用実績を持っている。この際の社会経済指標および住宅に関する主たるデータソースは、モデル分析期間である1986～2006年の間

5年ごとの国勢調査である。交通データは、同様に、1986～2006年の間5年ごとに得られるTransportation Tomorrow Survey (TTS)を用いており、国勢調査データとの高い整合性を確保している。また、労働統計と建設ストックや土地利用に関するサードパーティの提供するデータも使用している。いずれのデータも、国勢調査データのスペックに合わせるようにして整合性を確保している。

モデルの仮定と現実のデータは、適切な説明変数選択と関数型の決定を統計的に行うことで整合性をとっている。また、このモデルは基準年の予測を行っていない。基準年としたのは1986年で、1986～2006年間の20年間のシミュレートを行い、国勢調査やTTSや他のデータによる観察データと1991～2006年のシミュレート結果と比較し、その予測誤差から得られる情報をフィードバックすることでモデル改善を進めている段階である。

f) モデル適用の実際

相互に関係するアプリケーションが2つある。ひとつは、トロント都市圏におけるオンタリオ政府の土地利用計画"Places to Grow"の評価であり、もうひとつは、トロント都市圏における土地利用と交通政策による温室効果ガスの排出の影響の評価である。

これらの適用事例において関係者は、理論的な範囲では概要として理解するものの、詳細はわからないようである。政策立案者には、より直観的に理解してもらっている。また、実際にはまだ詳細モデルとしては、実行可能ではないので、その結果に対して関係者の信頼を得ているわけではない。しかし、数年前に比べて、このプロジェクトのために出資して買っている地方自治体や州、連邦政府を含め、このようなモデルの使用に関して興味は高まってきた。

モデルを実際に適用してみて、開発者が得た示唆としては、これまで居住者に対して、以前の居住地、以前の自動車保有の有無などを800世帯に対して独自に行ったデータは、人々の記憶にたよりつつも、有効で、費用対効果が高く、信頼できると判断できるということである。特に、住宅と自動車のような、高価な買い物に関する動的な選択行動の詳細を聞くにあたって10年というのが過去に遡ることができる適当な時間の長さのようである。

ILUTEは、まだ開発中のモデルである。十分に適用可能なバージョンに改良し、2008年春にテストができるように進められている。そして、これは、完全なバージョンとしてではなく、実際の適用を通して改良し続けるものと考えられている。

4. おわりに

本稿は、UrbanSimとILUTEをとりあげ、その開発者へのヒアリング内容を、マイクロシミュレーション都市モデルの現状と課題として、とりまとめたものである。もちろん、住宅選択にマイクロシミュレーションを採用しているIRPUDや完全なマイクロシミュレーションとして開発中のPECASなど、適用例の豊富な他のモデルも存在する。いずれの場合も、膨大なエージェントデータの行動を、詳細空間分析単位上で、ほぼ1年ごとのシミュレーションとして計算し、各都市政策の効果を土地利用・交通の相互作用の観点から予測している。この結果は、政策意思決定者の判断材料の1つとして、各地に有効に機能している例が見られる。

一方で、シミュレーション結果と観察データとの高い整合性の確保、意思決定者への詳細内容の理解度向上、オープンリソースとしての公開性システムの構築など、さまざまな課題が存在することも、改めて明かとなった。マイクロシミュレーションモデルは、適用例を踏まえて継続的に改良を進めていくタイプのモデルである。実際の都市政策への適用例を増やし、そこから得られる現実的な課題の解決を通して、改良し続けていくことが重要である。

本論文は、平成18～19年度科学研究費補助金（基盤研究(C)）、課題番号：18560524、研究課題名：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)の研究成果の一部をとりまとめたものである。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Michael Wegener: Overview of Land-Use Transport Models, Proceedings of CUPUM'03, CD-ROM, 2003.
- 2) <http://www.urbansim.org/>
- 3) <http://www.civil.engineering.utoronto.ca/infoabout/staff/professors/miller/Publications.htm>
- 4) Paul Waddell and Gudmundur F. Ulfarsson, Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models. In Handbook in Transport, Volume 5: Transport Geography and Spatial Systems, Stopher, Button, Kingsley, Hensher eds. Pergamon Press, pp.203-236, 2004.
- 5) Miller, E.J. and P.A. Salvini, "The Integrated Land Use, Transportation, Environment (ILUTE) Microsimulation Modeling system: Description & Current Status", Chapter 41, in D. Hensher (ed.) The Leading Edge in Travel Behaviour Research, Amsterdam: Pergamon, pp. 711-724, 2001.