

事例紹介：特集

社会シミュレーション&サービスシステムが目指す世界

エージェント・ベースド都市シミュレーション

兼田 敏之*

*名古屋工業大学 大学院工学研究科 愛知県名古屋市昭和区区御器所町
*Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa, Nagoya, Aichi, Japan
*E-mail: kaneda.toshiyuki@nitech.ac.jp

キーワード：メガシティ(mega-city), エージェント・アプローチ(agent approach), 開発／運用プラットフォーム(modeling & simulation platform)

JL 0007/13/5207-0629 ©2013 SICE

1. はじめに

本稿では、エージェント・ベースド社会シミュレーションの実用化領域としてのエージェント・ベースド都市シミュレーション(Agent-Based Urban Simulation, 以下ABUS)について概説する。この領域の21世紀に果たす役割・ニーズとともに、わが国の技術者・研究者の知恵を結集させるに足るチャレンジングな課題であることを示す。

2. 次世代インフラとメガシティ

2.1 次世代インフラの可能性

2010年に刊行された文献¹⁾によれば、計算の詳細は明らかにされていないものの、全世界におけるインフラ部門のうちGDP換算で15兆ドルが無駄にされており、また、500名を上る経済学者へのアンケート調査では、そのうちの4兆ドルはICT等により活用できるとされた。この報告書とちょうど時期を同じくして、smarter city, smart community, big-data, analyticsといった産学官を挙げての次世代インフラ開発の流れが形成されることとなる。

2.2 メガシティは21世紀の都市問題

メガシティとは、直感的に説明するならば、人口一千万

人以上規模の都市圏を指す。2012年には、都市域人口一千萬以上のメガシティは26、その予備群である五百万以上の都市圏は43ある。うち、経済の伸び足の速いアジア・太平洋地域における都市圏の成長は著しく、それぞれ15(中国4、日本・インド各3、インドネシア・韓国・フィリピン・パキスタン・バングラデッシュ各1)、22(中国12、インド5、ベトナム1、パキスタン1、タイ1、マレーシア1、シンガポール1)を占め、今後もまた成長が予測される^{2)~4)}。長年にわたってスラム改善と公共住宅政策を掲げてきた国連居住計画(UN-HABITAT)が、最近では都市投資誘導と都市ガバナンスを前面に掲げるようになったのが、筆者は印象的なできごとである⁵⁾。

2.3 圏域規模と経済水準別に必要なインフラ

粗っぽい素描であるが、タテに圏域の人口規模を小さい順に、近隣住区(人口一万級)、徒歩生活圏域(五万級)、日常生活圏域(三十万級)、メトロポリス(百万級)、メガシティ(千万級)、国家域(一億級)、超国家域(数十億級)に並べ、ヨコに、わが国を例とした成熟国における各域の特徴、とくに経済利便性/文化快適性、環境配慮/省エネルギー、災害安全性/保健衛生、さらには新興国(人口あたりGDP4,000ドル以上約12,000ドル未満)、途上国(人口あたりGDP4,000ドル未満)、

表1 圏域規模と経済水準別に望まれるインフラ

圏域規模	わが国における意味合い	成熟国(わが国を例)における典型的なインフラ(次世代インフラを含む)			新興国(圏域)に望まれるインフラ (人口あたりGDP4,000~約12,000ドル)	途上国(圏域)に望まれるインフラ (人口あたりGDP4,000ドル未満)
		経済利便性/文化快適性	環境配慮/省エネルギー	災害安全性/保健衛生		
超国家域 (人口数十億級)	・グローバル経済/多国間交易協定 ・地球規模の資源環境問題 ・地球市民/国際NPO	・国際空港/港湾 ・世界遺産	・地球温暖化に係る国際協力	・被災時/減災の国際協力 ・国際感染症対策	・国際空港/港湾 ・世界遺産	・国際空港/港湾 ・世界遺産
国家域 (人口一億級)	・外交/安全保障 ・ナショナルミニマム ・メガシティ間インフラ	・リニア新幹線 ・高速道路網 ・国家的文化資産の保全	・地球シミュレータの開発運用 ・省環境負荷/省エネの民間投資に対する補助 ・小口発電/緑化の促進補助 ・環境税/エネルギー税	・トラフ連動型震災対策 ・原子力災害時の対策 ・国内感染症対策	・新幹線 ・高速道路網 ・国家的文化資産の保全	・新幹線 ・高速道路網 ・国家的文化資産の保全 ・電力システム
メガシティ (人口一千万級)	・21世紀に直面する都市問題 ・肥大化する災害脆弱性 ・国際的文化発信拠点	・都市内高速道路 ・内発的イノベーションを創発する消費者集積 ・国際的都市間競争力を持つ産業集積	・動的路価(dynamic road-pricing) ・スマートグリッド ・環境モデル都市	・多重性・冗長性に基づくフレジエースの確立 ・密集市街地の改造	・都市内高速道路 ・地下鉄 ・電力システム&スマートグリッド ・環境モデル都市	・都市街路網 ・地下鉄 ・電力システム&スマートグリッド ・環境モデル都市
メトロポリス (人口百万級)	・20世紀が直面した都市問題 ・24時間の都市活動 ・環境モテル都市	・地下鉄 ・電力システム ・内発的イノベーションを創発する産業集積	・スマートグリッド ・環境モデル都市	・救急/復旧/復興拠点	・都市街路網 ・地下鉄 ・電力システム&スマートグリッド ・ごみ処理施設	・下水道システム ・汚水処理施設 ・高等教育施設 ・クリーンエネルギーへの転換
日常生活圏域 (人口三十万級)	・日常生活が完結する圏域 ・内発的「應わい」のクリティカルマス ・コンパクト都市の可能性	・都市街路網 ・LRT	・ごみ処理施設 ・コンパクトシティ(compact city)	・平常時の救急施設 ・非常時の救急/復旧拠点 ・地域感染症対策拠点	・下水道システム ・汚水処理施設 ・高等教育施設 ・クリーンエネルギーへの転換	・上水道システム ・中等教育施設 ・都市農業
徒歩生活圏域 (人口五万級)	・日常生活圏域のサブセンター ・自動車を用いない生活	・下水道システム	・汚水処理施設 ・「歩いて暮らせるまち(walkable city)」	・広域避難スペース ・中等教育施設の感染症対策	・上水道システム ・都市農業	・初等教育施設
近隣住区 (人口一万級)	・児童や高齢者を含めた生活コミュニティの基礎単位 ・対面交流と相互扶助	・上水道システム	・市民による環境配慮活動 ・都市農業	・住民避難スペース ・被災時/減災の相互扶助サービス ・保育/児童施設の感染症対策	・医療施設の普及	・公衆衛生の普及

たり GDP4,000 ドル未満）のおののに望まれるハード/ソフトのインフラを並べ、文献⁶⁾を含むいくつかの資料から表 1 を作成した。

個々の地域には特殊解のみしか存在しないものの、上下水道システム・都市圏内交通システム・電力システム・新幹線等、都市インフラの大規模な要素システム技術については、成熟国が科学技術イノベーションにより次世代インフラとして規格化し推進整備するとともに、新興国や途上国にこれらを供給する立場にある。これらを考える際、人口規模が 10 の 7 乗、すなわちメガシティが鍵となることが容易に推察されよう。次世代インフラの提供は、東京やニューヨークといった現在でいうメガシティを半世紀前から抱える成熟国が果たすべき役割の一つである、と認識すべきである。

3. 実用エージェント・ベースド都市シミュレーション(ABUS)の可能性

都市づくりに係る社会シミュレーションにもまた半世紀にわたる歴史があるが、ここでは、21世紀のメガシティ問題を念頭に、ABUS が果たしうる役割について素描してみたい。

3.1 都市シミュレーションに対する実用ニーズの可能性

以下に社会シミュレーション全般が果たしうる用途を例示する。

- (1) 現象の生起/創発プロセスの検討
- (2) 政策/制度設計における計量的な評価/検討
- (3) 政策/プロジェクト・シナリオの探索/検討
- (4) 政策/システム実現効果の可視化
- (5) 短期未来の予測制御

うち、(1)は基礎研究にあたり、実用を論じる本稿では触れない。(2)は費用便益分析の方法論とともに進展が続いている。また、(5)は、プローブ計測やそのリアルタイ

ム・データ処理といった先進技術の進展により実用化が期待される。(3)(4)は、すでに定評が確立されていると考えられる。

つぎに、具体的に考えられる実用シミュレータを例示する。

(例 1) 都市化や土地利用の長期的コントロール、プロジェクト投資の経済的・社会的・市民の生活質・環境負荷などのインパクトを検討するシミュレータ

(例 2) ITS や動的ロードプライシング、EV ステーション配置のあり方を検討する日常交通行動シミュレータ

(例 3) 小口電力市場取引制度下におけるリアルタイム予測制御を行うシミュレータ

(例 4) 大規模プロジェクトあるいは大規模サプライチェーンを有する組織における緊急時危機管理シミュレータ

(例 5) 新型感染症の発生において適時に伝播可能性予測を行い、適切な対策を講じる社会危機管理シミュレータ

うち、(例 1) は以前から都市シミュレータと呼ばれており、研究蓄積が多い。また、(例 2) は交通シミュレータの研究蓄積の上に現在、開花しつつある。今後は全般において、次世代インフラの計画・運用・評価に資する次世代シミュレータの開発が期待される。

3.2 エージェントアプローチの広汎な可能性

前述の都市シミュレータや交通シミュレータでは、時代順にいって、集計量を変数とするマクロ計量モデルや意思決定主体個々の挙動を扱うマイクロ・シミュレーションが研究されてきた。エージェントアプローチは後者の進展型としても解釈できるが、データフィッティングが重視されてきた経緯もあり、前者 2 つが不要になったわけではない。ここでは、まず実用 ABUS を念頭に置いた際のエージェントの概念を整理して表 2 に示す。

この分類では、(a) 空間移動エージェント（交通行動・群集行動）、(b) 経済活動エージェント（交換・資源配分・投資）、(c) 交流エージェント（分散協調・世論形成伝達・伝

表 2 実用 ABUS を念頭においた際のエージェントの概念分類

大分類 中分類	特徴と典型	エージェント数の規模目標
(a) Spatial Moving Agent (movement) 1) Vehicle (traffic behaviors and congestion phenomena) 2) Pedestrian (individual and crowd behaviors)	「動き」 ・ 交通行動 ・ 群集行動	メガシティ(一千万級) メガシティの一部(百万級)
(b) Economic Agent (transaction, resource-handling) 3) Exchange (land-landuse-REIT-market transaction) 4) Allocation (purchase, rent, energy-saving, time allocation) 5) Investment (for e.g. public facilities, private real-estate and energy-saving)	「交換」と「資源配分」 ・ 交換 ・ 資源配分 ・ 投資	メガシティ(一千万級)～ メガシティ(一千万級)～ メガシティ(一千万級)～
(c) Network Agent (social communication, emergence) 6) P2P Communication (esp. for V2V traffic congestion ordination) 7) Social Exchange and Emergence (esp. on SNS) 8) Organizational/Project Management (esp. In Emergency Relief) 9) Pandemic and Anti-Terrorism counter-measures	「コミュニケーションの偏在」 ・ 分散協調 ・ 世論形成 ・ 伝達 ・ 伝播	メガシティ(一千万級)～ 超国家域(数億級) 国家域(一億級) 超国家級(数十億級)
(d) Governance Agent (devising institutions and regulations etc.)	「統治／規則」	国家域の一部(数千級)

播), さらには(d)統治エージェント, としたが, 機能を複合したエージェントも当然設計しうる。ここで, 代表的なシミュレーション事例を挙げた際にエージェント数の実用目標がメガシティ級に上ることが多い点に注目されたい。個人をもって一エージェントを充てるのがシミュレーションでは率直かつわかりやすいが, その規模は10の7乗となる。

3.3 ABUSのポジショニング

ここでは, 都市シミュレーションにおけるエージェントアプローチのポジショニングをより詳しく考察するために, 伝統的な都市動学モデルのうち3つの典型を取り上げ, ABUSの試みを表3に示す。いずれもマイクロ・シミュレーションの進展型としてABUSを解釈することができる。

- (A) 投資・移民・環境資源ダイナミクス(Investment, Immigration & Environmental Resource (II&R) Dynamics): 土地利用変化といった都市空間上における社会経済活動の動学モデルが進化したもの。新都市経済学モデルやHuffモデル, WilsonモデルやLorryモデルの系譜を継ぐ。
- (B) 都市圏内日常活動ダイナミクス(Daily Activity (DA) Dynamics): 都市圏における日常交通行動の動学モデルが進化したもの。古くは交通計画のための四段階推定法, さらにはMcFaddenによるロジットモデルを用いた非集計交通行動モデルの系譜を継ぐ。
- (C) 緊急時の救急・復旧ダイナミクス(Emergency, Relief & Restoration (ER&R) Dynamics): 大震災時などの緊急事態の再現とその救急・復旧プロセスを表現したもの。震災時被害モデル, 家屋倒壊モデル, 火災延焼モデル, 避難行動モデルといった個々の要素モデルは以前より存在していた。

この3つの典型は, 時間刻み単位とシミュレーション対象期間の違いとしても区別される。II&Rダイナミクスは3ヶ月から1年を単位として10年間から50年間, DAダ

イナミクスは1秒から1時間を単位として1日から1年, ER&Rダイナミクスは救急救命では5分から1時間単位で3日間, ライフラインでは1日単位で1週間から3ヶ月間, 復旧では1ヶ月単位で3年間が標準的といえよう。なお, ER&Rダイナミクスでは時間刻みを設けない事象駆動型モデル等も考えられる。II&R, DAともに, ロジット=ポアソン結合モデル(LLPM: Linked Logit and Poisson Model)¹⁴⁾が合理性モデルとしていたんは完成しており, それを超えようとするエージェントアプローチの試みは次章で後述する。DAの事例についても併せて後述することとして, II&Rにおいて, エージェント・ベースドを名乗るUrbanSim⁷⁾は, 近隣効果(neighborhood effect)を考慮した意味で複雑系指向ではあるが一種のLLPMといえ, 次章で詳述するエージェントアプローチには該当しない。また, ER&Rにおいて初めてエージェントアプローチによりシステム統合に取り組んだロボカップレスキューの複合シミュレータ^{10), 11)}試作には, 相応の困難があったと記憶している。

4. 都市圏内日常活動ダイナミクスにみるエージェントアプローチ

DAダイナミクスでは, LLPMがいわば合理性モデルとして実用シミュレータとして完成していたこともあり, また, 大規模性, 豊富なデータとの突合せ, モデル研究の蓄積もあって, それを超えようとするエージェントアプローチの試みには考察するに足る十分な含意を持つ。ここでは, 2000年前後以降のエージェントアプローチの潮流を解説する。

4.1 活動ベースド・モデル

DAダイナミクスに属する交通行動モデルは, 従来のトリップ・データとは異なる活動ベースのデータを用いるもので, 後者のデータを用いたモデルをとくに活動ベースド・モデル(activity-based model)と称する。トリップ・データ

表3 エージェント・アプローチの取組みがある都市動学モデル(Urban Dynamics)の3つの典型例

シミュレーションの名称	扱う対象	扱いうる鍵概念	シミュレーション期間と単位時間	エージェントの特徴	エージェント・ベースド都市シミュレーションの事例	系譜(数理モデルならびに計算機モデル)
(A) Investment, Immigration & Environmental Resource (II&E) Dynamics	環境制約下における土地や土地利用に係る多種多様な主体の経済活動	・不動産(所有/利用/受益権)の運動市場 ・都市化プロセス/都市の盛衰/土地利用パターン変動 ・ハーディングの投資効果 ・市民の厚生状態	10~50年(3ヶ月~1年)	・各種役割主体の意思決定のヘテロ性(heterogeneity) ・地主/生活主体等の意思決定の限界合理性 ・開発業者/ブローカー等営利主体の先読み意思決定(学習)	UrbanSim 7)	Huffモデル, 新都市経済モデル →Lorryモデル →Wilsonモデル, 熊田等
(B) Daily Activity (DA) Dynamics	各種主体の都市内日常活動	・ソフト交通政策の効果(動的道路課金/主体間通信) ・小口取引制度下における電力需給の即時制御 ・パンデミック初期の都市内対策 ・観光/商業/マーケティングへの応用	1日から1年(1秒から1時間)	・活動主体の意思決定のヘテロ性 ・スケジュール(計画案)を持つ活動主体とその再更新 ・活動主体の意思決定の適応学習	transims 8), Albatross, MATsim, Aurora~Feathers, ASSA, SOARS 9)上の感染症シミュレーション	Gravitationモデル(四段階推定法) →非集計交通行動モデル(McFadden) →LLPM
(C) Emergency, Relief & Restoration (ERR) Dynamics	震災等都市の緊急非常時における障害と救急救助/復旧	・都市における脆弱部分の検討 ・都市内障害時における各主体の行動 ・救急救助の組織的対策 ・被災者対策とライフライン復旧方略	【救急救助】3日(5分~1時間) 【ライフライン】1週間~3ヶ月(一日) 【復旧】3年(1ヶ月)	・非常時における生活主体の意思決定のヘテロ性(パニック行動等) ・救急救助組織や復旧組織のコンテンジエンシートな意思決定 ・救急救助組織内外の非常時協調行動	ロボカップレスキュー 10), 複合シミュレータ 11)	震災時被害モデル, 火災延焼モデル, 避難行動モデルなど要素モデルのみ

タはとどのつまり OD(Origin-Destination) ペアとして表現され、発着ゾーンを行列要素とする OD 行列として集計されるが、OD の発着点そのもので行われている活動（用事）には注意を向かない。それに対して活動ベースド・モデルでは、1 日間なり 1 週間なりのスケジュールを各自が用意し、そのスケジュール上に自らの活動を配分するところから始まる。このアプローチは 80 年代から試みられてきたとのことである。日常活動では 1 回の外出に複数の活動（用事）を予定するのが普通であるし、自らの活動計画を立案するためには知的機能を要する。また、個々が活動計画を最適化させたとしても、予想もしない混雑や活動の変更に直面する。これらに対応して柔軟に活動計画を変更する再スケジューリング (re-scheduling) 機能は、より高次な知的機能である。このような DA ダイナミクスのクラスにおいて 2000 年前後から、スケジュールを持つ個体を巡ってエージェントアプローチが模索されるようになった。Albatross, Aurora~Feathers, MATSim, ASSA などである。

4.2 DA ダイナミクスにおけるエージェントアプローチ

エイントホーベン工科大学グループの Albatross^{14)~16)} はその嚆矢である。ロジットモデルはランダム効用を用いるものであるが、Albatross では効用概念を用いず、かわりにあらかじめ作り込まれたルール適用アルゴリズムで個々の個体が行動するルール・ベースド・モデルである。Albatross の特徴は、データを二分木ルールとして抽出するために教師付き学習アルゴリズムを用いた点にある。データマイニングソフトウェア C4.5, CHAID などが適用されたが、最終的に CHAID が採択されたとある。学習ベースド・シミュレーションと銘打っているが、学習はあくまでデータ採取のためであり、個体の学習による動学プロセスを扱ったものではない。

彼らが、予期せぬ遅延を負の効用値として表現し、トリガーを用いて再スケジューリングを行うモデルを開発したのは Aurora~Feathers^{21), 22)} においてである。

一方、ETH とベルリン工科大の連合チームが開発した MATSim^{17)~20)} では、全個体の活動スケジュールを集計し、混雑等による負の効用値を個体ごとに求め、(イノベーショ

表 4 日常行動 (Daily Activity) シミュレーションにおける主体のクラスとプロセスのクラス

主体意思決定モデルのクラス	クラスの特徴(現実データの解釈に着目して)	モデル事例
(I) 完全均衡整合型(全体合理性モデル)	ミクロ経済学でいう市場均衡やゲーム理論でいう単一のナッシュ均衡かつパレート最適解を求めるために定式化されたモデル。求解するために主体意思決定や主体間相互作用系に対して不自然に強い仮定を設ける。費用便益分析では、この解に向かっての改善をもって効果計測を行う、という意味で規範性を有する。	CGE(計算一般均衡モデル)(I)
(II) 事後合理型(個人合理性モデル)	主体意思決定の現実データを、各々の主体が合理的に意思決定を行った結果と事後的に解釈するモデル。ランダム効用理論に基づき擾乱項を正規分布(その近似としてのガンベル分布)すると仮定したプロビットモデルやロジットモデルが該当する。主体意思決定の合理性モデルであるが、全体系が全体合理(完全均衡)も個人合理(ナッシュ均衡)も達成している訳ではない。	LLPM(ロジット=ポアソン結合モデル)(II)
(III) 条件適合(ルール)型主体意思決定モデル (限定合理性モデル)	環境や内部状態を前件とし意思決定を後件とするプロダクションルールの集合を主体を持ち、定められた手続きによりルールを一つ選択し、これにより意思決定を行う。主体意思決定の現実データからデータマイニング手法により二分木等のルール集合を生成する。	Albatross (III)
(IV) 制約充足型主体意思決定モデル (限定合理性モデル)	主体意思決定の現実データを、制約条件下における満足化意思決定とみなし、そのメカニズムを構築する。意思決定の際には制約条件下における効用の満足化原理(最適化原理はその特殊な場合)を用いる。なお、制約条件の機械的同定が困難な点に課題がある。	-
適応／学習のクラス	α) ナッシュ均衡求解イテレーション	MATsim (II) + α) ナッシュ均衡(に準じる)
	β) 状況(制約条件)変化に伴う適応	Aurora~Feathers (III) + β)
	γ) 期待一帰結の比較による強化学習	ASSA (IV) + β) + γ)

ン・スイッチ OFF の場合) 成績の悪い 10%に対して、経路(あらかじめ数ルートに絞り込んでおく)・交通手段・出発時間などのいずれか一つを変更し再計算を行う。その繰り返し(iteration)によって、経験的にはナッシュ均衡に準じる定常状態が求まる。これは交叉を用いず突然変異のみを用いた一種の進化計算である。定常状態における集計量ベースのパフォーマンスは現実データに近似するとされる。

筆者らが 2005 年から 2010 年まで推し進めた ASSA (Agent Simulation of Shop-Around) プロジェクトは、交通行動モデルでなく規模も大きくないが、商業地内回遊行動を行うスケジュールを持ち再スケジューリングを行い、さらに店舗選好値(効用)の強化学習を行う点で、知的エージェントアプローチと称するもので、スケジュール形成が制約充足(満足化)問題として定式化された限定合理性モデルである。パフォーマンス評価枠組も提案したが、データフィッティング手続きに課題を残した。

4.3 合理性と適応・学習の扱い

上記の考察を踏まえて、個体の意思決定モデルを 4 つのクラスに整理して表 4 上を得る。順に説明を加える。

(I) 完全均衡整合型(全体合理性モデル): 求解できる一つのナッシュ均衡かつパレート最適解が存在するように、個体の意思決定モデルや相互作用系に一群の仮定を設けたもの。ゆえにその解は全体合理かつ個人合理である。CGE(Computational General Equilibrium) モデルなどが該当するが、費用便益分析ではこの状態からの乖離をもって社会的費用と呼ぶ等、ある種の規範性を持つ。ただし、仮定があまりに「不自然」な場合はその限りではない。

(II) 事後合理型(個人合理性モデル): 現実データを各個体が合理的に意思決定を行ったためと事後的に解釈するもの。たとえば、ロジットモデルではランダム効用を用いてデータフィッティングと効用最大化(個人合理性)を両立させた。LLPM が該当する。

(III) 条件適合ルール型(限定合理性モデル): 環境や内部状態を前件とし、意思決定を後件とするプロダクションルールの集合のある規則で適用するもの。個体の挙動をコンティンジェンシー(contingency)として表現する。前述の Albatross が該当する。

(IV) 制約充足(満足化)型(限定合理性モデル): 制約条件下における満足化意思決定問題として捉え、現実データと整合したメカニズムを模索する。制約条件の同定手続きが確立されているわけではない。

つぎに、前述の各シミュレータから適応/学習のクラスを 3 つに整理して表 4 下に示す。

α) ナッシュ均衡求解イテレーション: 全体状態に対して、個体をランダムないし順番に取り上げその個体が「逸脱可能」かを判定し、もし「可能」ならば新たな行動を選択させる。これを繰り返して、すべての主体が「逸脱不能」になるならば、この状態が個人合理性の帰結としてのナッシュ均衡である。

ある。ナッシュ均衡は存在性も一意性も保証されていないが、ナッシュ均衡に準じる均衡概念(たとえば、MATSimにおいては SUE (Stochastic User Equilibrium)) を用いることにより、ふつうは定常状態を得る。ただし、これは高々比較静学であり、動学プロセスとは呼びにくい。

β) 状況(制約条件)変化に伴う適応: 内外の状況(制約条件)の変化に応じて、あらかじめ定められたトリガーが起動し、その際に意思決定の再計算を行う。再スケジューリングは適応機能の一種であり、動学プロセスである。Aurora ~ Feathers, ASSA が該当する。

γ) 期待—帰結の比較による強化学習: 繰返し行動におけるおののの行動後、タスクの成否あるいは事後効用実績値と期待効用値の差異に応じて、効用関数の形状を変更する。これは強化学習の一形であり、動学プロセスである。ASSA の個別店舗の選好行動が該当する。

5. 実用 ABUS 開発/運用プラットフォームを望む

エージェント・ベースド社会シミュレーションの開発/運用に有用な汎用性の高いソフトウェアは全世界に数十あると言われているが、その多くは教育用であり、10 の 7 乗規模に対処できるか疑問が残る(なお、MATSim は汎用ソフトではないが 10 の 7 乗が可能と明記されている)。図 1 に、実用 ABSU の開発工数と費用便益の関係を示す。シミュレータの精緻化により便益の増分が逓減(tapering off)するのに対して、開発工数の費用は規模に対して逓増する。そのため開発には最適規模があり、開発工数を低減させるプラットフォームは規模を上方に押し上げるはずである。

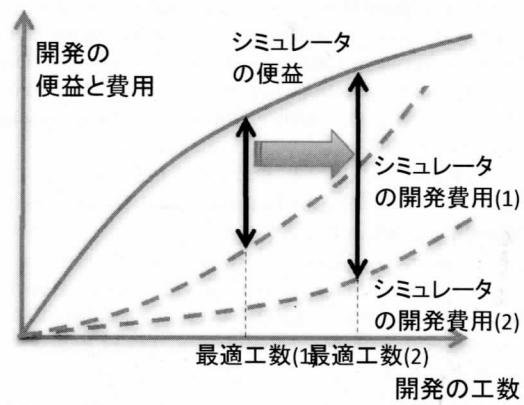


図 1 シミュレータ開発の工数と便益/費用

6. 都市シミュレーション工学はいかにして可能か?—結びに代えて

以上、本稿では、ABUS を物的制約の大きい社会シミュレーションとして捉えて概説した。社会システムの挙動における不確定性の特質は、主体の意思決定時に他者がどう

出るかわからないという多重コンティジェンシー (multiple contingency) にある。メガシティ規模のエージェント数・モンテカルロ型リスク表現・動学プロセスに係る進化計算・データフィッティングにおけるマイニング手法や計算統計学の応用等が技術者・研究者のチャレンジの中心となろう。

結びに代わる提題であるが、その解のヒントは、異質な専門知を結集させる知的コミュニティにあると筆者は思う。産官学の垣根を超えた役割分担の再設計が望まれる。

(2013年4月28日受付)

参考文献

- 1) IBM Institute for Business Value : The world's 4 trillion dollar challenge (2010), <http://www-05.ibm.com/tr/events/ibmcozumlerzirvesi2011/pdf/GBE03278USEN.PDF> (Last accessed on Mar.22, 2013)
- 2) Demographia: Demographia World Urban Areas, 8th Annual Edition: Version 2 (2012), <http://www.demographia.com/> (Last accessed on Mar. 22, 2013)
- 3) 日本経済新聞：大都市圏、総合力競う、2013年2月19日朝刊第9面(2013)
- 4) 王洋、兼田敏之、崔明姬、田美英：2000年代の中国における都市圏の人口増加に関する研究、計測自動制御学会第1回社会システム部会予稿集17/22(2012)
- 5) UN-HABITAT : The State of Asian Cities 2010/11 (2010), <http://www.unhabitat.org/pnss/> (Last accessed on Mar.22, 2013)
- 6) Asian Development Bank:Green Cities (2012), <http://www.adb.org/publications/green-cities> (Last accessed on Mar.22, 2013)
- 7) <http://www.urbansim.org/> (Last accessed on Mar.22, 2013)
- 8) <http://code.google.com/p/transims/>
- 9) <http://www.soars.jp/ja/>
- 10) 北野宏明、田所諭(編)：ロボカップレスキュー、共立出版(2000)
- 11) T. Kaneda, F. Matsuno, H. Takahashi, T. Matsui, M. Atsumi, M. Hatayama, K. Tayama, R. Chiba and K. Takeuchi : Simulator Complex for RoboCup Rescue Simulation Project — As Test-Bed for Multi-Agent Organizational Behavior in Emergency Case of Large-Scale Disaster, RoboCup-2000: Robot Soccer World Cup IV, Stone. P et al (eds.), 321/326, Lecture Notes in Artificial Intelligence 2019, Springer-Verlag (2000)
- 12) V. Grimm, et al.: A Standard Protocol for Describing Individual-Based and Agent-Based Models, Ecological Modelling, **198**, 115/126 (2006)
- 13) J.G. Polhill, D. Parker, D. Brown and V. Grimm: Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change, Journal of Artificial Societies and Social Simulation, **11**-23 (2008)
- 14) T. Arentze, A. Borgers, F. Hofman, S. Fujii, C. Joh, A. Kikuchi, R. Kitamura, H. Timmermans and P. Van Der Waerden : Rule-Based versus Utility-Maximizing Models of Activity-Travel Patterns, in 9th International Conference on Travel Behaviour Research, **3**, 569/583 (2000)
- 15) T. Arentze and H. Timmermans : Measuring Impacts of Condition Variables in Rule-Based Models of Space-Time Choice Behavior: Method and Empirical Illustration, Geographical Analysis, **35**-1, 24/45 (2003)
- 16) T. Arentze and H. Timmermans : A Learning-based transporation oriented simulation system, Transportation Research B, **38**, 613/633 (2004)
- 17) <http://www.matsim.org/> (Last accessed on Mar.22, 2013)
- 18) M. Balmer, B. Raney and K. Nagel : Adjustments of Activity timing and Duration in an Agent-Based Traffic Flow Simulation, in T. Timmermans (ed.): Progress in Activity-Based Analysis, 91/114, Elsevier (2005)
- 19) M. Balmer : Travel Demand Modeling for Multi-Agent Transport Simulations: Algorithms and Systems, PhD dissertation, ETH Zurich (2007)
- 20) M. Balmer, K. Meister, M. Rieser, K. Nagel and K.W. Axhausen : Agent-Based Simulation of Travel Demand: Structure and Computational Performance of MATSim-T, Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung 504, ETH Zurich (2008)
- 21) T. Arentze, C. Pelizaro and H. Timmermans: Implementation of a Model of Dynamic Activity-Travel Rescheduling Decisions: An Agent-Based Micro-Simulation Framework, 9th International Conference on Computer for Urban Planning and Urban Management (CUPUM), paper-48 (2005)
- 22) T. Bellemans, D. Jansens, G. Wets, T. Arentze and H. Timmermans : Implementation Framework and Development Trajectory of the Feathers Activity-Based Simulation Platform, Transportation Research Board 2010 Annual Meeting (CD-ROM) (2010)
- 23) T. Yoshida and T. Kaneda : An Architecture And Development Framework For Pedestrians' Shop-Around Behavior Model Inside Commercial District By Using Agent-Based Approach, 9th International Conference on Computer for Urban Planning and Urban Management (CUPUM), Paper-215 (2007)
- 24) 兼田敏之、吉田琢美：歩行者回遊行動のエージェントモデリング、オペレーションズ・リサーチ、2008年12月号、672/677 (2008)
- 25) 吉田琢美：知的エージェントアプローチによる商業地歩行者回遊行動シミュレーションモデルの開発に関する研究、名古屋工業大学博士論文(2010)
- 26) T. Yoshida and T. Kaneda : The ASSA Project: An Intelligent Agent Simulation of Shop-Around Behavior, in T. Murata, T. Terano and S. Takahashi(eds.), Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems VII: Post-Proceedings of The AESCS International Workshop 2012, Springer-Verlag (2013, forthcoming)

著者紹介

かね だい とし ゆき
兼 田 敏 之 君



1983年東京工業大学工学部社会工学科卒業、88年同大学大学院博士課程社会工学専攻修了、工学博士。東京工業大学工学部助手、愛知県立大学文学部助教授を経て、現在、名古屋工業大学大学院工学研究科教授(主担当、創成シミュレーション工学専攻・都市シミュレーション工学分野、建築・デザイン工学科)。専門は、社会工学、都市計画、都市シミュレーション。