

# 7

## 社会シミュレーションと 参加型デザイン

石田 亨 京都大学大学院情報学研究科  
寺野 隆雄 東京工業大学大学院総合理工学研究科  
鳥居 大祐 (株) NTT DoCoMo 総合研究所  
村上 陽平 (独) 情報通信研究機構

社会シミュレーションにおけるエージェントは、社会から得られた情報を用いて意思決定を行い、他のエージェントや社会に対して作用を及ぼす行動主体である。社会シミュレーションの場合には、人間や組織をエージェントとしてモデル化することが多い。社会シミュレーションには、大きく分けて2つのアプローチがある。第1は複雑な社会現象の解明を目的としたもの(分析型)で、エージェントは可能なかぎり単純化してモデル化される。複雑な現象は、エージェント相互のインタラクションによって生まれると考える。第2は新しい社会システムの創造を目的とするもの(創造型)で、人間や組織の挙動を現実に近いかたちで再現する。エージェントのモデルは複雑になることを厭わない。新しいシステムを実装する前段の実験や、利用者に疑似体験を与える訓練などに用いられる。本稿では、主として第2のアプローチを解説する。創造型の社会シミュレーションの応用は、証券取引、交通制御、航空演習、避難誘導、環境保全など多岐にわたる。こうした応用で、社会シミュレーションは参加型デザインと融合し、新しい社会システムの設計方法論へと発展しつつある。

### 社会シミュレーションの現状

コンピュータシミュレーションは、現象の理解、モデリング、予測、実験などを目的に、物理、化学をはじめ幅広い分野で利用されてきた。モデリングの主流は、システムの挙動を支配方程式で表現するトップダウン的手法である。それに対し、マルチエージェントシミュレーションは、要素と要素間の相互作用をモデリングするボトムアップ的手法である。従来、実験が困難であった、社会、経済、文化など、人間の意思決定が中心となる問題への接近法として研究が行われている<sup>☆1</sup>。このようなマルチエージェントシミュレーションは、社会シミュレーション<sup>4)</sup>と総称され、社会現象の理解と社会システ

<sup>☆1</sup> 環境、気候などの自然現象も、人間の経済活動を考慮してモデル化することが多くなっている。

ムの創造の手段として注目され始めている。たとえば米国では、テロ対策や感染症対策のためにシミュレーションが用いられている(コラム参照)。

社会シミュレーションは、その目的により大きく2種類に分類できる。

#### (1)社会システムの分析

第1に社会現象の理解や社会システムの分析に利用されている。マルチエージェントシステムが人間社会を素直に表現できるため、社会学者が利用し始めている。社会科学における実験や証明、発見の方法としてシミュレーションを用いる「人工社会」もその一部である。ここでの特徴的な概念は「創発」である。この概念は非線形システムを扱う複雑系理論に由来しており、要素どうしの相互作用からまったく異なるレベルの現象が生まれることを表している。マルチエージェントシミュレーションは、創発における個体の属性や行動(マイクロレベル)と社

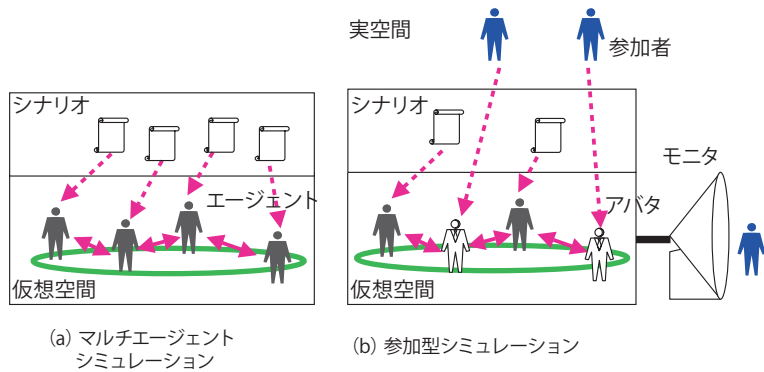


図-1 参加型シミュレーション

会集団（マクロレベル）の関係を理解するために利用されている。ところで、エージェントのモデルが複雑になると、モデルの属性値とシミュレーション結果との因果関係の分析が難しくなる。そこで、各エージェントのモデルは簡潔なものとし、複雑さをエージェントの相互作用により生じるとする Axelrod の KISS (Keep it Simple, Stupid) 原理に従うのが一般的である。

## (2) 社会システムの創造

社会シミュレーションはまた、新しい社会システムの創造や、複雑なシステム開発の前段階の実験や訓練に用いられる。創造型のシミュレーションは、新しい情報システムの開発・検証に力点が置かれるため、モデルが複雑になることは厭わない。ロボカップサッカーリーグ、Trading Agent Competition (TAC) などの競技もこのタイプのシミュレーションの一種といえる。フライトシミュレータのように単に操作手順を習得するのではなく、災害時や戦場での状況判断と現場での適切な社会的インタラクションを学ぶためのシステムが開発されている。利用者に疑似体験を与えることで、空間探索や意思決定を訓練することもできる。ユビキタスコンピューティングなど、社会に埋め込まれる情報システムを人々がどのように利用するかを知るためにも用いられる。現場での実験が不可能な場合には、こうしたシミュレーションの必要性は高い。シミュレーションにステークホルダ（当事者）のさまざまな視点を反映するには、デザインプロセスに人間を参加させること（参加型デザイン）が大切となる。

## 参加型シミュレーション

### シミュレーションへの人々の参加

エージェントと人間が協力して行うマルチエージェントシミュレーションは、参加型シミュレーションと呼ばれている。たとえば訓練システムでは、指導員などの役

割を演じるエージェントと訓練を受ける参加者によってシミュレーションが進行する。従来の訓練システムが、主に機械の操縦法を学ぶことを目的にしてきたのに対し、参加型シミュレーションは社会的インタラクションを訓練できるため、企業のマネジメントや集団のトレーニングなどに利用されている。

図-1 (a) にマルチエージェントシミュレーションを示す。シミュレーションシナリオの記述に従って各々のエージェントの行動が制御されている。次に、マルチエージェントシミュレーションを図-1 (b) に示す参加型シミュレーションへと拡張する。これを実現するには、シナリオで制御されているエージェントのいくつかを、参加者が制御するアバターに置き換えればよい。エージェントとアバターは制御の方法が異なるだけで、シミュレーションでは同等に扱われる。本稿では、ソフトウェアで制御される行動主体をエージェント、参加者が制御する行動主体をアバターと呼び区別する。エージェントとアバターを同等に扱うことにより、仮想空間でのシミュレーション過程を、参加者の振る舞いを含めてモニタを通じて観測することができる。

図-1 (b) に示すように、参加型シミュレーションは、1) 人やグループをモデル化するエージェント (agent), 2) 参加者やそのグループを表すアバター (avatar), 3) インタラクションを規定するシナリオ (scenario), 4) アバターを制御する参加者 (human subject), 5) 実空間を表現する仮想空間 (virtual space), 6) 仮想空間で行われるシミュレーションを可視化するモニタ (monitor) から構成されている<sup>☆2</sup>。

### 仮想市場への応用

U-Mart という参加型の仮想市場システムが教育研究に利用されている。その目的は、経済・社会システムの挙動に興味がある研究者、学生にテストベッドを提供することにある。以下では文献6) に基づいてシステムの機能と構成について述べる。

U-Mart は先物取引の仮想市場である。つまり、売り手と買い手が、将来の指定された時期に、取引対象物を、現時点で約定した価格で受け渡すことを約束する取引を対象とする。U-Mart では、システムが与える現物価格の情報に基づいて、参加者とエージェントが同等の立場で先物取引を行う。価格決定のメカニズムは「板寄

☆2 これは概念的な説明であって実装はさまざまでよい。たとえば仮想市場ではアバターは陽に存在せず、参加者が仮想空間を直接操作するのが一般的である。その場合にも、エージェントと参加者はシミュレーションにおいて同等に扱われる。

### テロ対策とマルチエージェントシミュレーション

2001年9月11日の航空機テロ以降、米国ではテロ対策に関する研究に多くの努力が払われている。米国の先端的な研究開発にはキラー・アプリケーションの存在が不可欠で、国の防衛にかかわるものも多い。社会シミュレーションも例外ではない。ここでは2つの例を示すが、いずれも政策決定に直結するものであり、今後の社会シミュレーション研究に大きな影響を与えるものと考えられる。

第1の例は、マルチエージェントシミュレーションと社会ネットワーク理論を利用したテロに対するリスク分析である<sup>5)</sup>。University of PennsylvaniaのBarry Silvermanは、テロリストの価値観を実装したシミュレータを開発している。こ

のシミュレーションでは、個々のエージェントは、人類学、心理学、政治学の理論と、医学、社会科学のサーベイや実験データに基づいて設計されており、15,000体のエージェントのシミュレーションが可能となっている。このシミュレーションの結果を用いて、テロリストの心理状態やストレスの原因を探る研究が行われている。また、Carnegie Mellon UniversityのKathleen Carleyは、テロ組織の動的変化を分析するAutoMAPというシステムを開発している。たとえば、陽に現れない組織のリーダーを同定したり、テロ組織のリスク分析を行うことを可能としている。このような研究は、人間を個々にモデル化するというマルチエージェントシミュレーションによって初めて可能となるものである。一方で、シミュレーションによって得られる結果をそのまま受け入れるのは危

うく、結果の解釈には注意を要する。

第2の例は、天然痘ウイルスによるバイオアタックのシミュレーションである。ブルッキングス研究所では、自然界では絶滅した天然痘ウイルスが生物兵器としてテロに使用される可能性が議論されている。保菌者が出た場合に、日常生活の中でどのように拡散していくか、流行防止のためのワクチン接種対策にどのような効果があるかを、居住区域と労働区域からなる都市モデルを用いて分析している。この例は「テロ対策」と銘打たれているが、日本にとっても他人事ではない。数年前のSARSも記憶に新しいし、鳥インフルエンザもいつ流行するか分からない。そのため、我が国でも感染症に関するシミュレーションが始まっている<sup>2)</sup>。

せ」と呼ばれるダブルオークションで、適当なタイミングごとにクライアントの注文量と価格を、需要供給の双方で積み上げ取引価格と取引量を決定する。これは実際の株式市場で行われている方法に基づいている。

U-Martの構成を図-2に示す。U-MartサーバとクライアントはLANまたはインターネットで結ばれている。クライアントはエージェントまたは参加者であるが、共に取引内容と数量の表記を定めたSVMP (Simple Virtual Market Protocol) に従う。クライアントが送信した売買の価格と数量に従って、サーバは仮想市場における先物の価格と取引量を約定してその情報を配信する。エージェントは仮想市場の先物価格とシステムから与えられた現物価格とを参照して(どのような複雑な計算過程を経てもよいが) 各々意思決定を行う。そして決算日に先物と現物の価格差を解消してシミュレーションの実行を終了する。

図-3にU-Martのインターフェースを示す。赤く囲った部分が参加者が取引情報を入力するフィールドであり、緑で囲った部分が、取引データの時間変化を示すグラフ

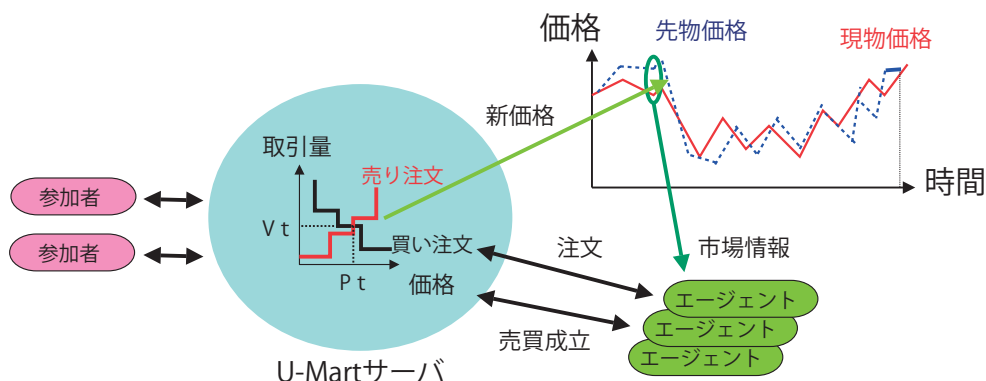


図-2 U-Martの構成

である。グラフを切り替えると取引に必要なさまざまな情報を入手できる。このインターフェースは参加者の便宜を図る目的で改良されてきたが、結果的に実際の取引にも使えるものとなっている。

U-Martは比較的単純なマルチエージェントシミュレータであるが、教育研究の双方に有用である。教育面では、工学や経済学の学生に対して、市場メカニズムの理解を助けるための実践的なコースウェアとなる。U-Martを用いたシミュレーションを行うことで、教科書では得られない、金融市場における人々の行動を実感することができる(図-4参照)。また、プログラミング教育を兼ねて取引エージェントを実現させることは、簡単だが奥の深い演習テーマとなる。

実際、U-Mart によるシミュレーションは、興味深い事実を明らかにしてくれる。以下にそのいくつかを示す。

- 特定の現物価格の系列により学習した結果は、他の系列(たとえ類似していても)で効果を発揮するとはかぎらない。すなわち、市場では過学習が生じやすい。
- リスク最小・利潤最大を目的とすると、何もしないという解が最善であることがある。
- 市場を活性化させるには、さまざまな性質や役割の人々の参加が不可欠である。たとえば、取引を活発化させるマーケットメーカーの影響をシミュレーションで分析できる。
- 金融取引の暴騰、暴落は取引操作のミスによっても生じる<sup>☆3</sup>。

これらの結果を踏まえて、今後の U-Mart 研究チームは、(1) 市場制度の設計・評価、(2) 市場に参加する人々の行動原理の解明、(3) 経済学・工学に共通する参加型シミュレーションコースの実現などを考えている。

## 参加型モデリング

### モデリングへの人々の参加

問題解決の過程に、それにかかわるステークホルダが参加すると、政府などがトップダウンに解決するのに比べ、現実的な解が得られやすい。市民参加によるまちづくりやごみ処理場の立地問題などがその例である。マルチエージェントシミュレーションを制度設計に利用する場合にも、こうしたステークホルダの視点を反映する必要がある。専門家が収集したデータや資料だけに基づいてエージェントをモデル化するだけでは、ステークホルダの視点が十分に反映されるとは言えない。

図-5 に参加型モデリングのプロセスを示す。まず、文献や調査を基にエージェントの初期モデルが構築される。次に、ステークホルダを取り巻く環境を再現した RPG (Role Playing Game) が実施される。その後、ステークホルダの意思決定過程を理解するためのインタビューが行われる。そして RPG のログデータとインタビュー結果の解析によりエージェントモデルの改良が行われる。

RPG を複数回繰り返すことによってエージェントモデルが改良されると、そのモデルを用いてマルチエー

<sup>☆3</sup> 実際にこの知見が U-Mart シミュレーションで得られた直後に、取引操作のミスで東証に混乱が生じた。

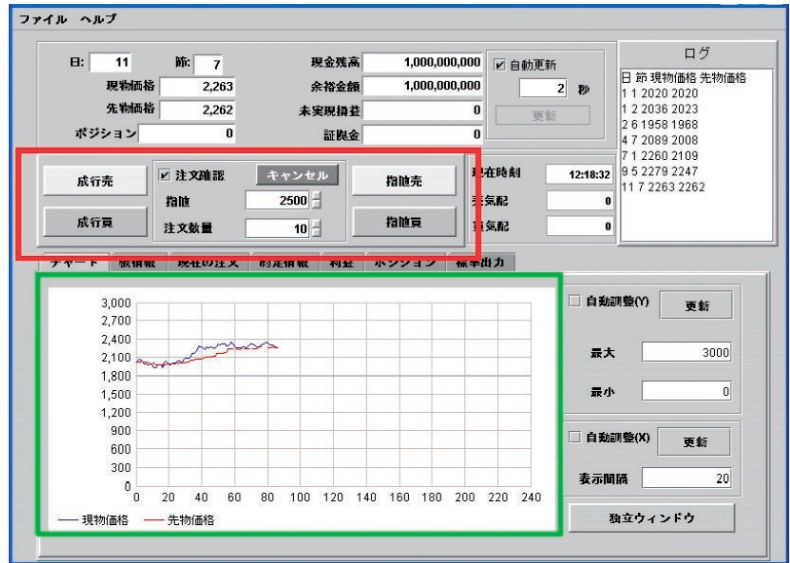


図-3 U-Martのインターフェース



図-4 U-Martを用いたシミュレーション風景

エージェントシミュレーションが実施される。シミュレーションのインターフェースはRPGを想起させるものがよい。ステークホルダはRPGを体験しているのでシミュレーション結果を容易に理解でき、モデルの改善を提案することができる。このように、RPGとマルチエージェントシミュレーションを用いることにより、現実に近いエージェントモデルを獲得できる。

### 農協経済の分析に応用

フランス国際農業研究所 (CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) は国際稲研究所 (IRRI : International Rice Research Institute) と共同プロジェクトを行い、ベトナムやタイにおける農作物選択や土地利用の分析に参加型モデリングを適用している<sup>1)</sup>。たとえばタイ東北部 (Khon Kaen 北部の Nam Phong 地方) では、ここ 30 年間、高台における換金作物の広がりが見られる。これは、低地に作付けされる米の値段が下落する一方で、高台に作付けされるサトウキビの値段が安定しているため

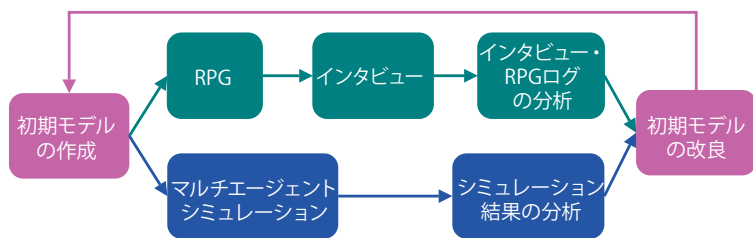


図-5 参加型モデリングのプロセス

と考えられる。このプロジェクトはこの仮説を検証し、農家の意思決定プロセスを理解し、将来のあるべき土地利用を描き出すことを目的としている。

図-6は、ステークホルダを取り巻く環境をボード上に再現したRPGを表している。RPGの結果はエージェントモデルに反映され、その後、土地利用に関するシミュレーションが行われる。図-7は、高台から低地に至るまでの作付けシミュレーションの結果を、RPGに参加した農家が評価している様子を表している。このシミュレーションにより、1) 換金作物を高台で栽培するインセンティブが農家にあること、2) 栽培作物の決定には大規模農家の影響が大きく、小規模な農家は栽培戦略をほとんど持っていないことが明らかになった。また、各農家はRPGとシミュレーションに参加することを通じて、サトウキビ価格の決定プロセスと、他の農家と協調して作物を栽培するメリットを理解した。

このように参加型モデリングでは、意思決定過程のモデルが得られるだけでなく、RPGやシミュレーションによって参加者である農家が問題を理解することを助ける。RPGにより参加者同士の議論が活発になり、他の農家の作物選択に対する考えや計画を相互に学習するのである。また、この事例では、ほとんどの農家はシミュレーション結果を妥当なものとして受け入れた。以上のように、参加型モデリングは、ステークホルダが納得するかたちで解決法を提供できる。また、問題解決プロセスに慣れていないコミュニティにも適用できる。しかし、ボードを用いたRPGで複雑な交渉を表現することは難しい。また、ログ解析は人手に負うところが多い、などの問題がある。ログ解析への機械学習の適用などを今後検討する必要がある。

## 拡張実験

### シミュレーションによる実験の拡張

最近、人々が新しい技術をどう用いるかを予測するための実証実験がよく行われている。しかし、今後普及が予想されるユビキタスコンピューティングでは、大量の電子デバイスが駅などの公共空間に埋め込まれる。実験



図-6 RPGの様子

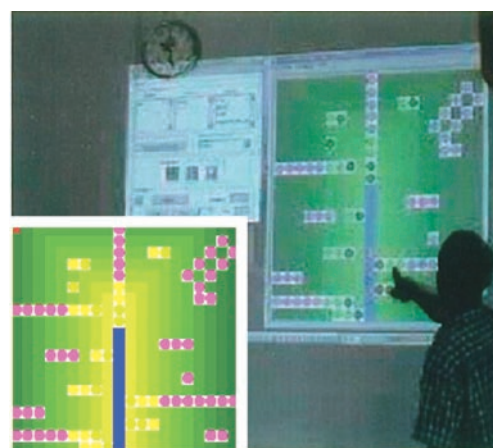


図-7 シミュレーションによるエージェントモデルの評価 (左下はスクリーンショット)

には機器の準備に加え公共空間の占有が必要となり、実現は容易ではない。また、公共空間での実証実験には多数の被験者が必要となるが、現実には十分な被験者を集めることは難しい。一方、シミュレーションは、さまざまな実験を行うのに適している。実験環境を整えるのが簡単であるのに加え、統制も容易である。また、実験の経緯を容易に記録することができる。

そこで、実空間での実験と仮想空間でのシミュレーションを統合することを考える。拡張実験 (augmented experiment) は、少数の被験者による実証実験をマルチエージェントシミュレーションによって拡張する手法である<sup>3)</sup>。図-8は拡張実験がどのように実現されるかを示している。図-8(a)は実空間での実験を、図-8(b)は、実験に仮想空間がいかに関与されるかを示している。実空間に配置されたセンサが参加者の行動を仮想空間に投影するのである。センサは、カメラでもRFIDでもGPSでもよい。この投影によって、実験全体の様子を仮想空間内のさまざまな視点からモニタすることができる。

拡張実験では、実空間での実験と並行して仮想空間でマルチエージェントシミュレーションが実行される。参加者に現実感を与えるために、エキストラを参加者の周

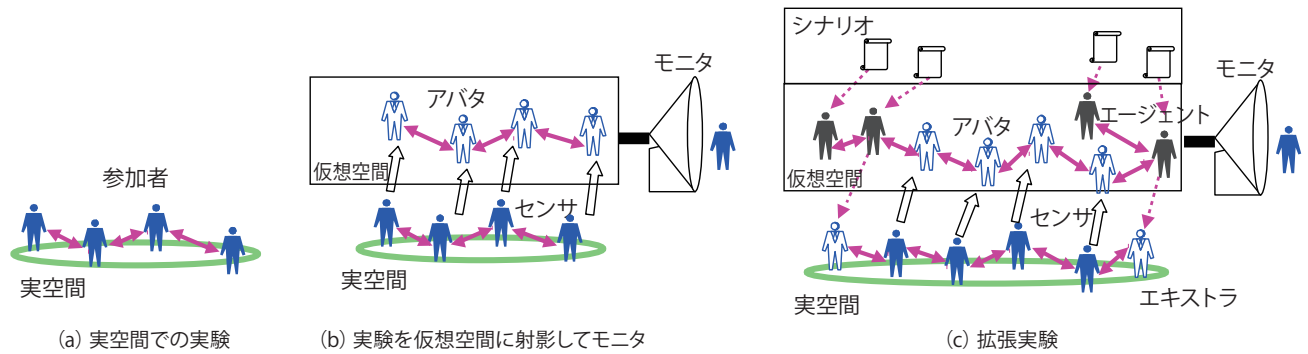


図-8 拡張実験

辺に置くこともできる。仮想空間での参加型シミュレーションとは異なり、参加者は実空間で自らの五感を用いて環境を理解し行動する。実空間での実験とシミュレーションの状況はモニタを介して知ることができる。モニタ上に現れる仮想空間内のアバタをポイントすることにより、実空間にいる参加者とコミュニケーションを行うこともできる。

図-8 (c) は拡張実験の構成を示している。拡張実験は、1) 人やグループをモデル化するエージェント、2) 参加者やそのグループを表すアバタ、3) インタラクションを規定するシナリオ、4) アバタを制御する参加者、5) 実空間を表現する仮想空間、6) 実空間で行われている実験と仮想空間で行われるシミュレーションを統合して可視化するモニタ、7) 参加者やそのグループを仮想空間に投影するセンサ (sensor)、8) 仮想空間と実空間をつなぐコミュニケーションチャンネル (communication channel)、そして 9) エージェントの指示を受けて、実空間で参加者に対応するエキストラ (human extra) から構成される。

### 避難誘導への応用

拡張実験の例として、屋内 (京都駅) と屋外 (京都大学周辺) で行われた実験を紹介する。共に、実空間での実験をシミュレーションで拡張しているのだが、センサや仮想空間を実現するテクノロジーが異なっている。

京都駅構内の実験を図-9 に示す。この実験ではセンサとして、天井に取り付けられた 28 台の自由曲面カメラが用いられている。センサからの入力映像は連結され 1 枚の映像となる。それを解析することにより、乗客の位置と動きが捕捉される。仮想空間としては、京都大学で開発された 3 次元仮想都市システム FreeWalk を用いている。モニタは仮想空間を映し、アバタの動きがホームでの乗客の動きを刻々描き出している。モニタを観察する管制官と乗客とのコミュニケーションチャンネルには



図-9 屋内での拡張実験

携帯電話が用いられている。管制官はモニタ上のアバタをポイントしコミュニケーションを始めることができる。下り回線を管制官が制御することによって、災害時に輻輳を避けながら現場とコミュニケーションをとるためのアイデアである。マルチエージェントシミュレーションが、実験と同時に実行され、その様子がモニタに映し出される。シミュレーションの状況は、携帯電話を通じて駅構内の参加者にも送られる。参加者は、シミュレーションの様子を頭に描きながら行動を選択していくのだが、実際の実空間ではシミュレーションの様子は見えない。さらに、実験とは関係のない乗降客が目の前を通るため、災害の臨場感は十分とはいえない。

図-10 に京都大学の周辺 (屋外) で行われた避難誘導実験の様子を示す。この実験では、センサに GPS を用い、参加者の位置と動きを捕捉している。仮想空間としては、2 次元の地図を用いている。モニタで観察されるアバタの動きは、大学周辺の参加者の動きを表している。モニタを観察する管制官と現場の参加者とのコミュニケーションには携帯電話が用いられている。3,000 体のエージェントからなるシミュレーションが、実験と同時に実行されモニタに映し出される。シミュレーションには、大規模なエージェント群を制御できる IBM 東京基礎研究所の Caribbean と、京都大学のシナリオ記述言語 Q が

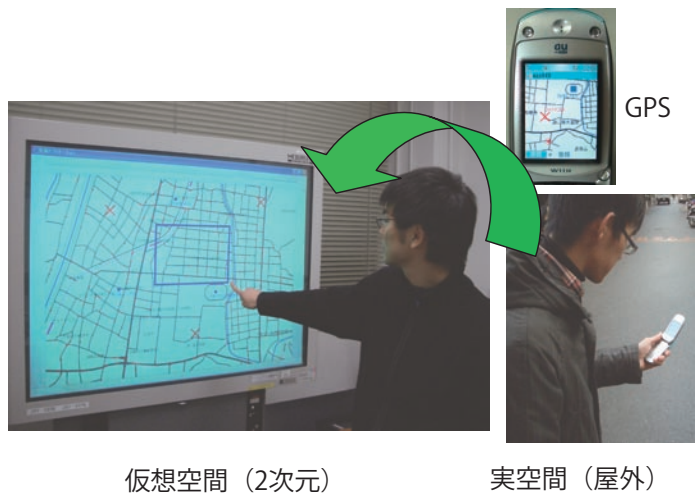


図-10 屋外での実験

用いられた。シミュレーションの状況は地図上に表示され、携帯電話を通じて刻々大学周辺の参加者に送られる。参加者はシミュレーションの様子を頭に描きながら行動を選択していく。これは屋内実験と同じなのだが、屋内実験で覚えた違和感はない。避難と関係のない市民が実験参加者の注意を引くこともない。拡張実験の臨場感は、技術だけではなく実験の場に大きく依存することが分かる。

### 課題と将来

参加型の社会シミュレーションには多くの課題がある。工学的課題はいかにシミュレーションを実現するかに関する課題であり、科学的課題はいかにエージェントをモデル化し、いかにシミュレーション結果を解釈するかに関する課題である。当面の工学的課題は大規模な参加型シミュレーションを実現することだろう。100万体のエージェント群を実現するには、膨大な並行処理を実装しなければならないが、シナリオライターに並行プログラミングの経験を期待することはできない。参加型シミュレーションの場合には、さらに、人とエージェントとのインタラクション設計が重要となる。こうした工学的課題が解決され、大規模参加型シミュレーションが実現可能となったとしよう。交通シミュレーションが行われ、仮想空間で多数の事故が発生したとしよう。この結果は何を意味するのだろうか。人は仮想空間で実空間と同じように振る舞うのだろうか。身体性の欠如は意思決定に根本的な相違をもたらすのではないか。こうした問いに答えるには、参加型の社会シミュレーションにかかわる科学研究が必要となる。また、シミュレーションで得られた結果の、何が重要で何が重要でないのだろうか。エー

ジェントの作り込みによって、どのような結果でも得られるのではないだろうか。シミュレーションから確かな知見を得るためには、シミュレーション結果の解釈手法を確立する必要がある。

#### 参考文献

- 1) Bousquet, F., Barreteau, O., Aquino, P., Etienne, M., Boissau, S., Aubert, S., Le Page, C., Babin, D. and Castella, J. C. : Multi-Agent Systems and Role Games : Collective Learning Processes for Ecosystem Management, M. Janssen Ed. Complexity and Ecosystem Management, Edward Elgar Publishers, pp.248-285 (2002).
- 2) Deguchi, H., Kanatani, Y., Kaneda, T., Koyama, Y., Ichikawa, M. and Tanuma, H. : Social Simulation Design for Pandemic Protection, World Congress on Social Simulation, pp.21-28 (2006).
- 3) Ishida, T., Nakajima, Y., Murakami, Y. and Nakanishi, H. : Augmented Experiment : Real-World Experiment Empowered by Multiagent Simulation, International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1341-1346 (2007).
- 4) Gilbert, N. and Troitzsch, K. G. : Simulation for the Social Scientist, Open University Press (1999).
- 5) Goldstein, H. : Modeling Terrorists : New Simulators Could Help Intelligence Analysts Think Like the Enemy, IEEE Spectrum, pp.18-26 (Sep. 2006).
- 6) 塩沢由典, 松井啓之, 谷口和久, 中島義裕, 小山友介 : 人工市場で学ぶマーケットメカニズム, U-Mart 経済学編, 共立出版 (2006). (平成 19 年 2 月 7 日受付)

**石田 亨 (正会員)**  
ishida@i.kyoto-u.ac.jp

京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻教授。IEEE フェロー、情報処理学会フェロー。マルチエージェントシステム、セマンティック Web 技術に取り組む。デジタルシティ、異文化コラボレーション、NICT 言語グリッドプロジェクトを推進。

**寺野 隆雄 (正会員)**  
terano@dis.titech.ac.jp

1978 年東京大学情報工学専攻修士課程修了。1978～89 年（財）電力中央研究所、1990～2004 年筑波大学大学院ビジネス科学研究科、1991 年工学博士号取得（東京工業大学）。2004 年～現在、東京工業大学大学院知能システム科学専攻教授。

**鳥居 大祐**  
toriid@nttdocomo.co.jp

2003 年京都大学大学院社会情報学専攻修士課程修了。2006 年同大学院社会情報学専攻博士課程修了。博士（情報学）。現在、(株)NTT ドコモ総合研究所に所属。

**村上 陽平**  
yohei@nict.go.jp

2003 年京都大学大学院社会情報学専攻修士課程修了。2006 年同大学院社会情報学専攻博士課程修了。博士（情報学）。現在、(独)情報通信研究機構研究員。言語グリッドプロジェクトを推進。