

3

ビッグデータと エージェントシミュレーション

基
礎

和泉 潔

東京大学大学院工学系研究科／科学技術振興機構 CREST

なぜビッグデータを利用した社会予測の精度が上がらないのか

近年のソーシャルメディアサービスの普及やセンサ技術の発展により、さまざまな社会経済的場面に関するデータが、大規模かつ高頻度に獲得できるようになった。これらの大規模データを分析することで、社会経済現象の動向をリアルタイムに把握したり、将来動向を予測したりすることに期待が集まっている。たとえば、ソーシャルメディア上のデータを分析し、株式市場や選挙結果、商品売上、景気動向の予測を試みた研究がいくつかある。しかし、大規模データを利用した予測モデルは、ある程度の予測精度を示すこともあるが、各分野の領域知識を利用した従来のモデルと比べると、さほど優っておらず新しい情報を加えることもないという主張がある³⁾。たとえば、選挙結果や音楽・映画のヒットの予測に関して、ソーシャルメディア上のデータによる予測よりもより単純でよく知られている指標の方が優れていた¹⁾。大規模データによる予測精度が上がらない理由として、Gayoらはデータを創出する母集団のバイアスを挙げ、単に大規模な集団から生じたデータというだけで、その分析結果を何も考えなしで社会全体を代表していると考えることに対して警告している²⁾。本稿では、上述の代表性の問題以外の理由として、社会経済現象におけるマイクロ・マクロ関係のダイナミクスを挙げる。そして、その問題を解決する1つのアプローチとしてのエージェントシミュレーションの可能性を論じる。エージェントシミュレーションの利用にはモデルの妥当性や信頼性が重要となる。そこで本稿の主題として、妥当性向上を目的とした大規模データ解析との統合について3段階に分けて研究事例を紹介する。

大規模データ解析とエージェントシミュレーションの統合

■ マイクロ・マクロループと構成論的シミュレーション

社会経済現象の予測が困難である原因は、社会経済現象にマイクロ・マクロループ¹¹⁾が存在するからである。社会経済現象におけるマイクロ・マクロループとは、個人の行動の集積がマクロなレベルの社会全体の動きを生成し、さらに社会全体の動きがマイクロなレベルの個人の行動を変化させていくような循環のことを意味している。このようなマイクロ・マクロループが存在するシステムでは、すべての期間に共通してマクロな挙動を予測できるような普遍的な方程式を見つけることはとても困難である。ある時期に大規模データから抽出した指標とマクロな動きとの間に規則性が見つかったとしても、別の時期にはマイクロ・マクロループから新たな規則性が出現してしまい、以前の規則性は時間とともに有効性が薄れていく。このため、マイクロとマクロの両レベルでの実データの間には、常に未発見の関係性（ミッシングリンク）が存在する。つまりマイクロ・マクロ関係を含んだモデルを構築しない限り、過去のデータから抽出した規則の単純な外挿だけでは、社会経済現象の予測は困難である。

エージェントシミュレーション研究は、マイクロ・マクロループが引き起こす構造変化のメカニズムを、構成論的シミュレーション⁴⁾と呼ばれるアプローチから解明することを目指している。現実の社会現象は、個人行動に対応するマイクロレベルや社会経済全体を表すマクロレベルのさまざまな要素が複雑に絡み合っている。そのため、マクロな挙動の原因を、少数のマイクロな要素のみに還元することは多くの場合不可能である。そこ

で、対象となる社会現象を再現できるような、個人の行動・相互作用ルール・外部環境などの複数の要素の条件をシミュレーションにより探します。計算機上に現象を生成（構成）できたミクロな要素やその相互作用の組合せが、実際のマクロな社会現象の原因となっている可能性が高いと考えるのである。複雑な社会経済現象の予測には、このようなアプローチによるメカニズムの理解が必要となる。

■ 大規模データ解析との統合の段階

エージェントシミュレーションを社会動向の予測に利用するためには、モデルの妥当性や信頼性が問題となる。その評価基準として最も有効なのは、モデルが現実の重要な側面を反映しているかどうかである。モデルの妥当性向上のために、大規模な実データ解析との統合手法の研究が進んでいる。本稿では統合の程度によって、図-1の3段階に分けて解説する。

ステップA: マクロデータの再現 シミュレーション結果を、現実の社会経済現象に関するデータと比較し、現象の特徴を再現できているかを評価する。マクロ変数の分布形状など実データの統計的性質の再現を基準とする。

ステップB: ミクロデータに基づく行動モデル構築 エージェントモデルに現実の要素を反映させるために、実際の社会経済現象の背後にある個人行動データを解析して、その結果をシミュレーションでのエージェントの行動ルールに実装する。

ステップC: 過去データにない新しいエピソードの発見 モデルの妥当性を確保した上で、過去のデータには現れていないがユーザにとって興味あるエピソードをシミュレーションで構成する。そのときのモデルの内部状態を分析し、将来もしそのようなエピソードが発生するとしたら、どのような状況で起こり得るかを調べる。

以下の章では、各段階での研究事例を具体的に紹介する。

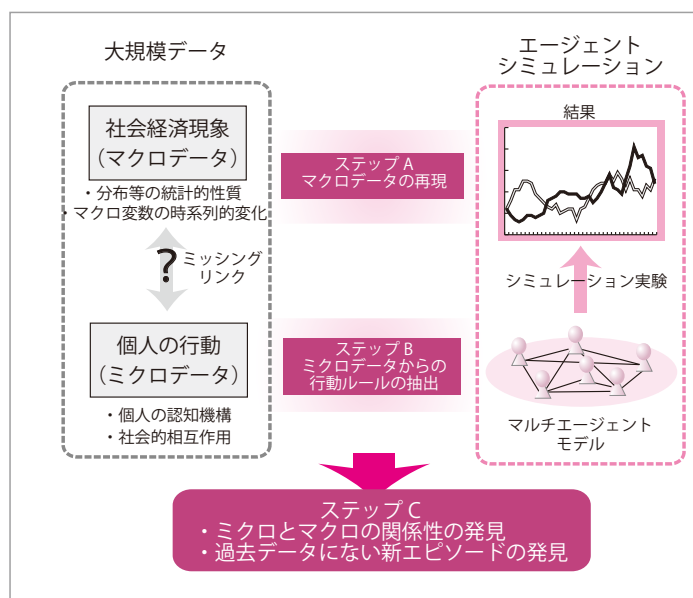


図-1 大規模データ解析とエージェントシミュレーションの統合の3段階

ステップA：マクロデータの再現

この段階では、マクロな挙動に関する統計的な解析結果を通してしか、大規模データとシミュレーションのつながりはない。エージェントモデルは実データを反映したものではなく、モデル作成者の仮説や一般的な定説を基に、かなり単純な行動ルールを仮定してモデル構築を行っている。できるだけ簡素なエージェントモデルで、実データのマクロな性質を再現することを研究目的としている。

■ ブログでの単語出現モデル

30万ユーザ、約5千万記事のブログデータから観測される単語の出現回数の成長と衰退を特徴付け、それらを再現した研究¹³⁾を紹介する。この研究では、感染症のモデルとして有名なSIRモデルを基にしたエージェントモデルを構築した。モデルには仮想的なブロガーであるエージェントが10万個存在し、各エージェントはGround, Excited, Finalのいずれかの状態にある。モデルパラメータは、各状態で対象の単語を書き込む確率と上の3つの状態の左から右へ状態が推移する確率である。パラメータの値を変えることにより、「定常的に出現する日常語」と「急激な上昇と衰退がある流行語」の2種類の出現パターンを、この比較的

単純な状態遷移型のマルチエージェントモデルで両方とも再現できた(図-2)。実データの再現だけでなく、単語の出現とブロガーの状態という実データだけでは見えない関係性の分析がシミュレーションで可能となっている。たとえば、図-2(b)の最下段で示す各状態の割合に対する時間発展から、徐々に Excited 状態のブロガーが増えブームになった様子を見ることができる。

■ 金融市場におけるべき乗則の再現

社会経済現象における大規模・高頻度データが集まるようになり、いくつかの現象に共通して見られる

統計的な性質が見つけられるようになった。最も有名なものの1つがべき乗則である。べき乗則とは、ある量が観測される確率や頻度がその大きさのべき乗に比例することを示す。たとえば、都市の人口分布、資産の分布、社会的なつながりの次数分布など、さまざまな事象で広く見られる。

Lux らはファンダメンタリストとチャートティストの2種類のタイプのエージェントが存在する人工市場を構築し、金融価格の変動分布のべき乗則を再現した⁷⁾。ファンダメンタリストは、さまざまな経済条件から決まる理論価格(ファンダメンタルズ価格)よりも、市場価格が高ければ(安ければ)下がる(上がる)と予想する。チャートティストは、直近のチャートの線形トレンドの外挿を用いて予想する。各エージェントは、この2つのタイプの平均利得を比較し、每期タイプ間を平均利得に応じた確率に従って遷移する。シミュレーションの結果から、一定期間の金融価格の変動値を集めて頻度分布を作成した(図-3)。すると、短い時間間隔での価格変動を集めたときは、人工市場の分布は両対数グラフで直線(べき分布)に近く、時間間隔が長くなるについて正規分布に近づいた。実際の金融市場のデータでも同様の傾向が見られる。

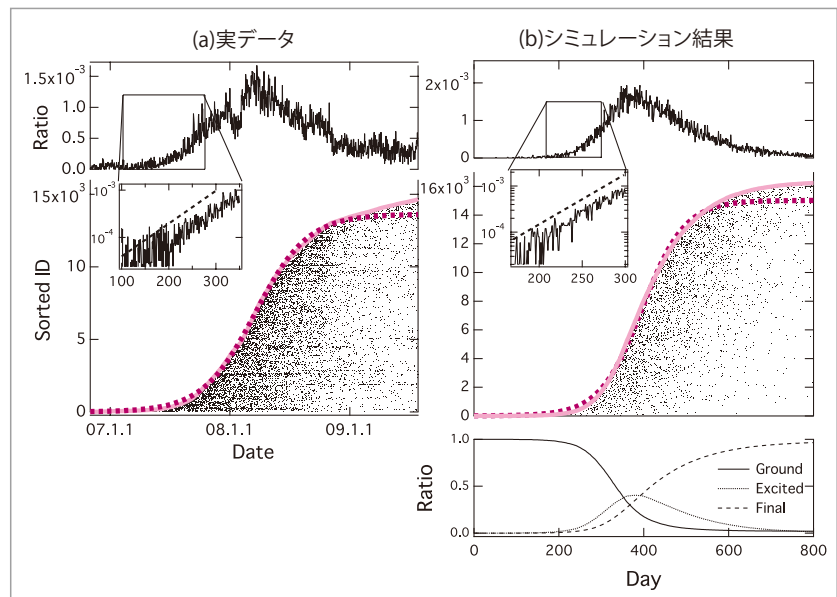


図-2 流行語「KY」の出現パターンの (a) 実データと (b) シミュレーションによる再現。各図の上段は1日ごとの全ブログ記事中の「KY」を含む割合。各図の2段目は各ブロガーが「KY」を含む記事を投稿した日のプロット。初出が早いブロガー順にソートしている。実線が初出時点を繋いだ曲線で、破線がロジスティック関数での近似結果。(b)の3段目は各状態のエージェントの割合。文献13)をもとに作成

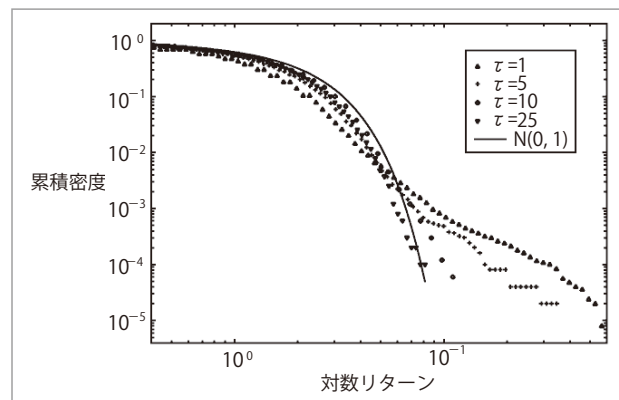


図-3 人工市場で価格変動の時間間隔 τ を変化した場合の対数リターン(価格変化率の対数値)の累積密度分布。実線は正規分布の累積密度分布(文献7)を一部改変)

ステップB: ミクロデータに基づく行動モデル構築

大規模データ解析は、エージェントモデルの構築に大いに助けになる。構築したモデルの設定を変えて複数の条件でシミュレーションを行い、モデルに入力するデータやモデルが出力した大量のデータを分析することができる。これにより、現実の状況を再現できる条件やある基準を最適化できるような条件をシミュレーションによって見つけ出すことを目的としている研究

を紹介する。

■ 不特定多数の人流データに基づく避難シミュレーション

複数個所での不特定多数の歩行者の動線を計測し、避難シミュレーションとの統合を行っている研究を紹介する。建物内の避難訓練を計測したデータを解析し、避難経路の個人差や避難誘導による影響をモデル化した研究がある¹⁴⁾。特定個所に設置したカメラで撮影されたステレオ画像処理を用いて動線を抽出し、最尤推定によって特定方向の動線の数が時間帯によってどのように変化しているかをモデル化する手法¹⁰⁾を用いている。この手法により、時間帯や期間などの異なる条件での対象個所の密度変化を分析したり、特定個所の人流解析を行っている。解析結果を1次元歩行者モデルを用いた避難シミュレータ Net-MAS に実装した。1次元歩行者モデルでは、歩行者エージェントの移動可能範囲は長さと幅を持つリンクで表現し、エージェントの位置はリンク上の進行方向にあるノードまでの距離で表す。また、移動速度は直前のエージェントとの距離から決定する。人流データの解析結果から、各エージェントの速度変化に関するパラメータや、複数の避難経路の選択割合や通過時間の値を決定した。この設定上で、避難訓練時の各ポイントでの避難者の密度や、全体の避難にかかった時間などを再現できることを確認した。さらにこのシミュレーションを用いて、誘導員が複数の避難経路をどういったタイミングでどのように誘導するかという意味決定の組合せ（避難誘導計画）の比較解析を行い、実データの分析だけでは得られない情報を得た（図-4）。

■ 特定人物の移動軌跡データに基づく室内移動シミュレーション

特定の人物に焦点をあてて計測した室内での長時間に渡る移動軌跡データを用いたシミュレーション研究を紹介する⁵⁾。手術室の天井に設置された超音波式位置計測システムにより、約10人の手術スタッフの術室内の位置情報を計測している。本システムにより、術中に1時間あたり約20万ポイントの位置情報が計

測され、1回の手術（8～10時間程度）での位置情報は150万から200万ポイントになる。区間分割とクラスタリングを行う軌跡データマイニング手法を用いて、膨大な情報から特徴的な作業に関連する移動パターンを抽出した。たとえば外回り看護師の第1クラスターに含まれる軌跡は、上下の大きな移動と水平面での中程度の移動という特徴を持っていた。これに関する動作は、手術ベッドの下で管を動かしたり、ベッドや器械台の下で医療機器を操作することが含まれる。これらの各スタッフの移動パターンでの軌跡と、各パターンがどの手術フェーズでどれくらい出現するかという情報を用いて、図-5のような術室内移動シミュレーションを行った。これにより、手術機器の配置などの術室レイアウトを変えた場合に、スタッフ同士またはスタッフと手術機器間での極端な接近（ニアミス）による危険な状況がどのように変化するかを事前に見ることができる。各エージェントは実データを反映した移動パターンを発生させるが、個別の移動軌跡の詳細はレイアウトの影響を受けて変化し、さらにあるエージェントの軌跡の変化が他のエージェントの軌跡の変化を引き起こすという軌跡間の相互作用をシミュレートできる。その結果として、各レイアウトでのニアミスの総回数や発生場所を推定でき、術室内でのスムーズな移動を阻害する／促進する要因を特定できる。

ステップC：過去データにない新エピソードの発見

エージェントシミュレーションとの統合によって、大規模データの統計解析だけでは分からない新しいことを発見できるようになるのか。シミュレーションは設定次第でどんな状況でも再現できるが、新しいことは何も発見できない。このような批判をよく受ける^{8), 12)}。本章では、この弱点を逆に強みとするような、新たな社会シミュレーションの方法論「可能世界ブラウザ」を紹介する⁶⁾。

モデルの確率的要素やカオス性の要因で、エージェントシミュレーションを同じ条件（同一シナリオ）で複数回実行したときでも、乱数系列を変えると、モデル

のマクロな挙動がいくつかの異なるパス（エピソード）として現れる。可能世界ブラウザでは、実データに基づきモデルを構築し（図-6a）、シミュレーションによりユーザが興味あるエピソードを作成する（図-6b）。そして、作成したエピソードに関して、モデルの内部で何が起きていたのかを分析して、そのメカニズムを知る（図-6c）。

以下の節で、可能世界ブラウザをマーケティングでの販売促進戦略の決定に応用した研究を紹介する⁶⁾。この研究では、顧客 ID 付きの POS (point of sales) データをもとにしたエージェントベースのマーケティングシミュレーションを構築する。そして、ミネラルウォーターを対象として、あるブランドの売上が増加するというエピソードをシミュレーションで作り出し、どのようなエージェントのタイプが態度変容すれば、そのようなエピソードが起こり得るかを調べる。

■ ID-POS データに基づく購買行動モデルの構築

コンビニエンスストアチェーンが発行する ID-POS データを用いて、エージェントの購買行動モデル構築とモデルのパラメータ設定を行う。

最初に、上述の「ステップ B: ミクロデータに基づく行動モデル構築」と同様に、ID-POS データを用いて、各購買客の態度変数とその時間変化（態度変容モデル）、そして態度変数から購買行動を出力する行動モデルを決定する。各エージェントの態度変数とは、顧客が日常的にコンビニエンスストアを利用する際に持っている購買行動パターンの組合せとする。ID-POS データのうち、データ期間 7 カ月で購買回数が 50 回以上の 12,174 人のレシートデータを用いて共購買データに関して主成分分析を行った。分析で得られた 15 個の主成分の得点（15 次元のベクトル）を用いて、各時点での顧客の態度変数を表す。15 個の主成分を見ると、購買行動パターンが比較的良好抽出できていた。

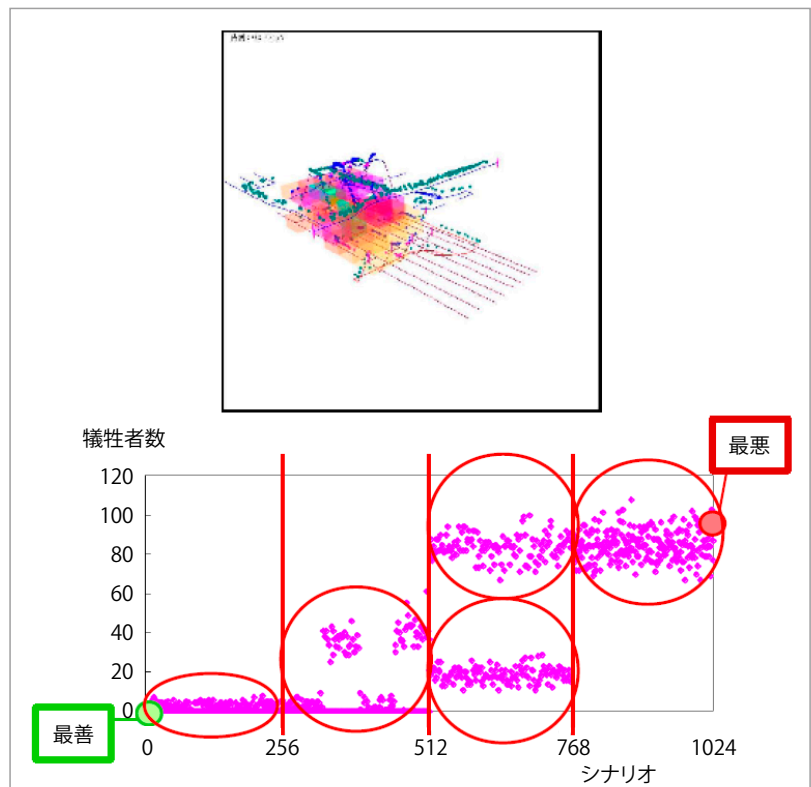


図-4 上図は、鉄道駅での避難シミュレーションの様子。下図では、複数の避難誘導計画の条件を横軸にして最終的な犠牲者数を比較した。各意思決定が及ぼす影響がクラスタの形で分析でき、相対的な重要さを読み取ることができる。文献9)より作成

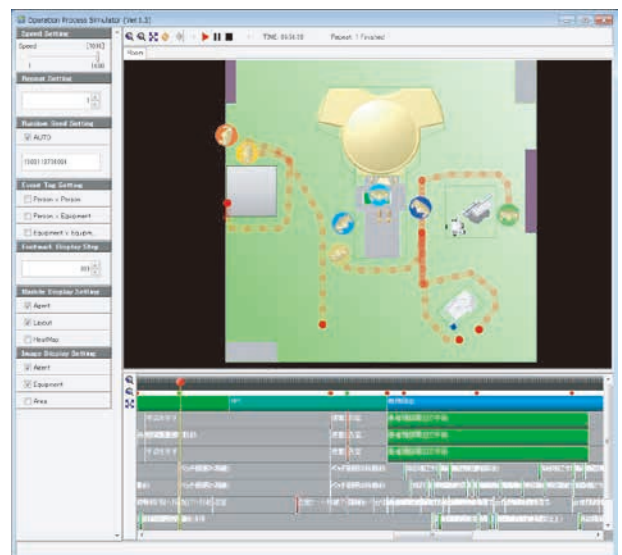


図-5 術室内移動シミュレーションのスクリーンショット

たとえばある主成分は、食品から日用雑貨まで幅広く購買する成分であり、総合購買成分といえる。ほかにも酒類—つまみ共購買、菓子類共購買などの成分が見られた。さらに、これらの態度変数の時間変化モデルを、自己回帰モデルとスモールワールドネットワーク

モデルを統合した形の式をベースにして、実データの解析によって係数を決定している。最後に態度変数から購買行動を出力する行動モデルを決定する。本モデルでの行動変数とは、各顧客がある一定期間ごとにミネラルウォーターの各ブランドを、このコンビニチェーンで購入した個数である。水を購入した延べ 29,780 人のデータに対して、ニューラルネットワーク、判別分析、k 近傍法を試した。交差検定法の結果、k 近傍法が一番精度が高かったので、本モデルではこれを採用した。

次に、上述の「ステップ A: マクロデータの再現」と同様にして、モデルパラメータの設定を行った。上述の行動モデルのいくつかの要素（季節変動を入れる／入れないなど）に対して、各ケースの場合の 15 次元の態度変数の全エージェントでの平均値を計算し実データと比較した結果から、誤差が最小だったモデルパラメータを採用した。さらに、モデルの妥当性の確認のため、態度変数の季節性を考慮したモデルで、7 カ月間全体での各ミネラルウォーターのマーケットシェアを計算し実データと比較して、マクロデータの再現性テストも行っている。

■ 特定ブランドのマーケットシェア増大エピソードの作成

実データではマーケットシェアが 1 割に満たない 2 つのミネラルウォーターのブランド X, Y に注目し、各ブランドのシェアが実際の 2 倍以上になるエピソード

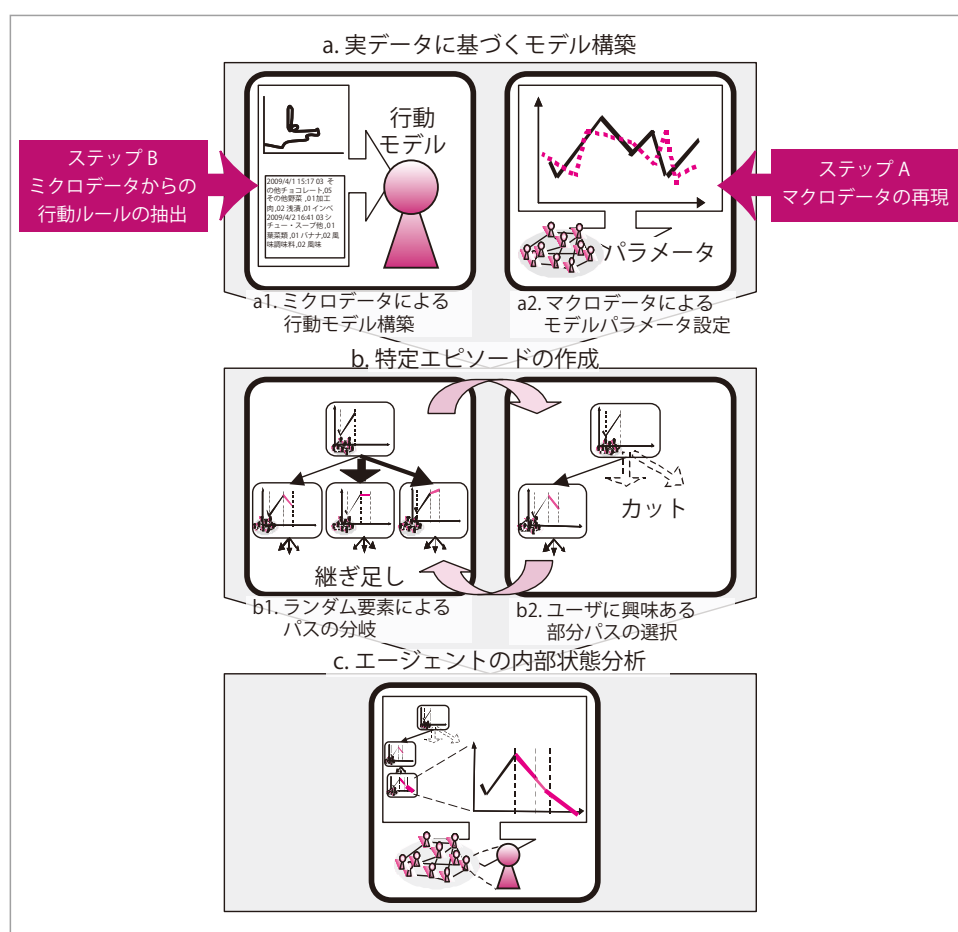


図-6 可能世界ブラウザの仕組み。文献 6) より作成

をシミュレーションで作成した。可能世界ブラウザの真骨頂は、特定エピソードの作成にある。可能世界ブラウザでは、エージェントシミュレーションの結果に偶然、興味深いエピソードが出てくるのを受動的に待っているだけではなく、積極的に興味あるエピソードを創り出そうとする。

ユーザはシミュレーション結果の購買数を見ながら、カットと継ぎ足しの操作を繰り返し、インタラクティブに自分の興味あるエピソードを作成する（図-7）。まず実データに基づく初期値から、異なる乱数系列の N 回の試行を行う。次に自分の興味に合う試行のある時点（図-7の左図の縦線）までの部分パスを選択し、他の試行はカットする。図-7の場合は中段のブランドの売上が上昇しているエピソード（図-7の左図の乱数系列 2 の折れ線）を選ぶ。新たに選択した時点（図-7の真ん中の図の縦線）の全エージェントの態度変数を新たな初期値として、新たな複数の乱数系列でシ

ュレータを再開して、その時点以降のパスを継ぎ足して分岐させる(図-7の右図)。可能世界ブラウザでは、モデルの状態変数の途中状態を記録しておく。そのため、特定の途中状態からその後のシミュレーションを再開して、シミュレー

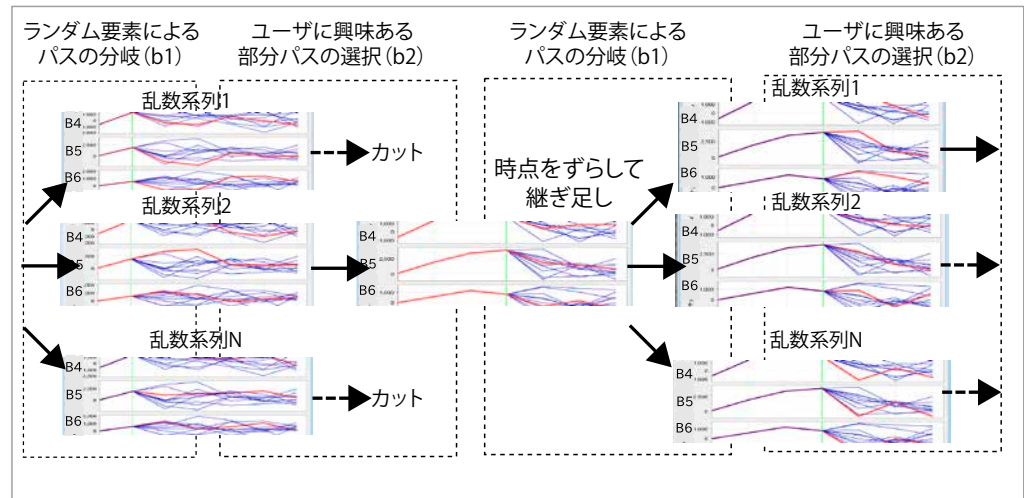


図-7 カットと継ぎ足しによる特定エピソードの作成。文献6) より

ション結果を継ぎ足すことができる。このようなシミュレーション結果の選択と融合により、興味深いパスをシミュレーションにより創り出していく。これによりマーケティングシミュレーションである商品のマーケットシェアが急激に伸びるパスを発生させることができるかもしれない。発生確率の少ない分岐を継ぎ足していけば、実世界では百万回に1回のみ発生するような特異なエピソードを、積極的にシミュレーションで構成できる。

上述の手順を繰り返して、各ブランドのシェアが20%近くまで上昇し、それぞれ8個中3位までになったエピソードを作成した。作成した各エピソードと実データについて、ミネラルウォーターの購買総数の週平均を比較したところ、作成エピソードで1.85%から4.94%程度の増加であった。つまりミネラルウォーターの購買全体数に大きな変化がなく、特定のブランドのマーケットシェアが増加している状態であった。

■ 内部状態分析による顧客ターゲティング

前節で作成したブランドX,Yのシェアが伸びた各エピソードについて、マーケットでどのような態度変数の変化が起きたのかを分析し、販売促進のターゲットを決定する。

ブランドXの増大エピソード

ブランドXのシェアが伸びたエピソードでシェア拡大に貢献した態度変数の要素(購買行動パターン)を、特定エピソード創出の操作をしなかった場合(基本エ

ピソード)の態度変数の平均値からの乖離を基に選定した。基本エピソードからの乖離と、特定エピソードでのブランドXの各期の購買総数の相関を調べて、相関の高い態度変数の要素がブランドXの販売促進のキーとなるとした。上記の分析により、ブランドXのシェアを上げたい場合に重要な購買パターンを2つ抽出し、この2つの要素x1,x2のスコアが高いような顧客をターゲットとすればよいため、そのような顧客像の推定を行う。この2つの要素はPOSデータの主成分分析より抽出された主成分である。各主成分に対する因子負荷量の絶対値が大きい商品カテゴリを分析した。酒類やデザートやお菓子に分類されるような商品カテゴリは2つの要素どちらについても正に大きな値となっている。これらの組合せは主に夜に自宅で消費される。また、要素x1について、女性誌が正に大きな値を持っている。もう1つの要素x2においてファストフード、たばこの値が正に大きく、要素x1においては生鮮品野菜の値が負に大きいことから、自炊をせず、さらに喫煙者の女性については2つの要素の値が大きくなる。このような女性は会社勤めをしている独身女性に多いのではないかと考えられる。また、女性に人気がないために調理麺、カップ麺の値は負に大きくなっていると推定する。このことから、ブランドXのマーケットシェア成長に必要なターゲットは「夜、帰宅途中にコンビニエンスストアによってお酒やデザートを買って帰る女性」が想定される。実際のデータでは、

ブランド X の購入者は女性が 62.2% と多かったが、その中で上記のようなターゲットに潜在的な販売促進の可能性はある。

ブランド Y の増大エピソード

前項と同様にして、ブランド Y のシェア拡大エピソードにおいて、重要な態度変数の要素を特定した。その結果、要素 y1 が負に大きく、要素 y2 が正に大きい顧客をターゲットとすればブランド Y のシェア上昇につながるのではないかと考え、そのような顧客像を推定している。要素 y1 の因子負荷量が負で絶対値が大きく、要素 y2 が正に大きい商品カテゴリに共通する商品カテゴリに家庭用品がある。このことから、ターゲットとすべき顧客として、独り身ではなく家庭がある顧客が想定される。しかし、ターゲットである顧客層は、要素 y1 で正の因子負荷量を持つ生鮮品やお酒などの他の日常用品は、主にスーパーで買いコンビニは補助的な役割として利用していると考えられる。そのため要素 y1 が負の値を持つ。また、要素 y2 の因子負荷量値が正に大きいカテゴリとしてベーカリー類が挙げられる。ベーカリー類とは普通のパンではなくコンビニエンスストアがベーカリーショップのように各店舗で焼き上げているパンのことである。一部の店舗でのみ取り扱っている。以上からブランド Y のシェアを上げるために、広告等のプロモーションのターゲットとするべき顧客層は「ベーカリー取扱店舗をよく利用する独り身ではない家庭がある顧客」だと想定される。

エージェントシミュレーションの効用

エージェントシミュレーションならば、実世界では百万回に 1 回しか発生しないような特異な現象を、何千・何万回も発生させることが可能である。実データに基づいて構築や妥当性検証が行われたモデルならば、シミュレーションで発生させた特異現象を分析して、現実世界への何らかの示唆を得ることが可能である。たとえば、その現象の原因がどこから生じる可能性があるのか、現象が起きたときにどのような対応を行えばその後の状況が変わるのかを論じることができる。このように、大規模データに基づくエージェント

シミュレーションによって、特異な現象にも対応できる社会経済システムのデザインを行うことができるのではないだろうか。そして、「想定外のリスク」を想定することによって、社会経済システムの安全性や信頼性 (dependability) を向上することが期待できる。

参考文献

- 1) Gayo-Avello, D. : A Warning against Converting Social Media into the Next Literary Digest, *Communications of the ACM* (2011).
- 2) Gayo-Avello, D., Metaxas, T. and Mustafaraj, E. : Limits of Electoral Predictions using Twitter, *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media (posters)* (2011).
- 3) Hagedorn, B. A., Ciaramita, M. and Atserias, J. : World knowledge in Broad-coverage Information Filtering, *Proceedings of the 30th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, pp.801-802 (2007).
- 4) Hashimoto, T., Sato, T., Nakatsuka, M. and Fujimoto, M. : Evolutionary Constructive Approach for Studying Dynamic Complex Systems, *Recent Advances in Modelling and Simulation* (Petrone, G. and Cammarata, G., eds.), I-Tech Books, pp.111-136 (2008).
- 5) 和泉 潔, 奈良 温, 伊関 洋, 鈴木孝司, 南部恭二郎, 鎮西清行, 村川正宏, 坂無英徳 : 手術室内の情報収集による術中モニタリングと手術戦略デスク, *電子情報通信学会誌*, Vol.94, No.4, pp.86-96 (2011).
- 6) 和泉 潔, 池田竜一, 山本仁志, 諏訪博彦, 岡田 勇, 磯崎直樹, 服部 進 : 可能世界ブラウザとしてのエージェントシミュレーション : ターゲットマーケティングへの応用, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J96-D, No.12, pp.2877-2887 (2013).
- 7) Lux, T. and Marchesi, M. : Scaling and Criticality in Astochastic Multi-agent Model of a Financial Market, *Nature*, Vol.397, pp.498-500 (1999).
- 8) Marks, R. : Validation and Model Selection : Three Measures Compared, *Complexity Economics*, Vol.2, No.1 (2013).
- 9) 野田五十樹 : ポストベタ時代における社会現象シミュレーションの可能性, *電気学会論文誌 C*, Vol.133, No.9, pp.1628-1631 (2013).
- 10) 大西正輝, 依田教士 : 大型複合施設における長期間にわたる人流比較と可視化手法, *電子情報通信学会論文誌 (D)*, Vol. J93-D, No.4, pp.486-493 (2010).
- 11) 塩沢由典 : 複雑さの帰結, NTT 出版 (1997).
- 12) 寺野隆雄, 中井 豊, 櫻井成一郎, 山本仁志, 岡田 勇 : エージェント・ベース・モデリングの技術と応用 : パネルディスカッション, *日本社会情報学会学会誌*, Vol.19, No.2, pp.45-53 (2007).
- 13) 山田健太, 佐野幸恵, 高安秀樹, 高安美佐子 : ソーシャルネットワークの力学 : ブログ解析から, *システム制御情報学会誌*, Vol.56, No.10, pp.536-541 (2012).
- 14) Yamashita, T., Soeda, S. and Noda, I. : Evacuation Planning Assist System with Network Model-Based Pedestrian Simulator, *Principles of Practice in Multi-Agent Systems* (Yang, J.-J., Yokoo, M., Takayuki Ito, Z. J. and Scerri, P., eds.), Springer, pp.649-656 (2009).

(2014 年 3 月 3 日受付)

■ 和泉 潔 (正会員) izumi@sys.tu-tokyo.ac.jp

1993 年東京大学教養学部卒業。1998 年同大学院博士課程修了。博士 (学術)。同年より 2010 年まで産業技術総合研究所勤務。2010 年より東京大学大学院工学系研究科准教授。人工知能・認知科学の研究に従事。