

不確実な社会を解くには —マルチエージェントと最適化—

藤垣 洋平, 坂平 文博, 森 俊勝

人間を含む社会システムに対して数理的な手法を用いて分析を行う際には、人の行動の多様性や相互作用がもたらす複雑さや不確実さに向き合う必要がある。本稿は、そのような複雑で不確実な社会を扱う手法の一つとして、マルチエージェント・シミュレーション (MAS) を紹介するとともに、MAS と最適化手法を組み合わせることで、複雑さや不確実さを考慮しつつ望ましい解を探索した事例を紹介する。また、そのような MAS の構築に特化したパッケージソフト「*artisoc*」についても紹介する。

キーワード：マルチエージェント・シミュレーション, 不確実性, 最適化手法

1. 社会の複雑さ・不確実さと向き合うために

社会におけるさまざまな場面において、適切な意思決定を助ける手法として、これまでに多くの数理的な手法が開発されてきた。特に、対象とするシステム内の複数の要因の相互関係を考慮して評価指標を定式化し、特定の目的に対して最適な施策を導き出すような最適化手法が、これまでさまざまな形で開発されており、実際に効果を上げている。

一方、人間を含む社会システムには、システム全体の挙動を考慮した評価指標の定式化が困難な複雑さや不確実さが存在する場合がある。複雑さや不確実さをもたらす代表的な要因としては、個人ごとの価値観や行動規範が異なる「多様性」や、人やモノ同士が局所的に影響を及ぼし合う「相互作用」が挙げられる。複数の人やモノ同士のミクロな相互作用の結果としてマクロな環境を変化させ、さらにその環境の変化に対して人が行動を変えろといった「ミクロ・マクロ・ループ」[1] が生じることで非線形のダイナミクスを生み出し社会を複雑にしている。

このような複雑さや不確実さが大きな影響を与える問題の例として、建物避難計画の問題と交通サービス設定の問題を挙げて具体的に説明する。まずは建物からの避難行動を分析し、できるだけ短い時間で逃げられるような避難経路を設計することを例に考える。もし避難者の歩行速度が全員一定であり、混雑の影響で歩行速度が低下することがなければ、避難時間は容易に定式化できる。しかし、実際には歩行速度は避難者

によってさまざまであり、さらに多くの避難者が一つの通路に集中すると混雑が生じて大幅に通行に必要な時間が長くなる。このように避難時間に大きな影響を与えることから、よりよい避難経路の設計のためには歩行速度の個人差や局所的な混雑を考慮する必要があるだろう。収益性の高いタクシーの配車を目指す場合には、走行費用と収入の関係について分析する必要がある。もし対象とするタクシーの利用者が、毎日指定した時刻と場所に必ず待っているという前提であれば、走行費用が最小となるような巡回経路を求める問題として、最適化すべき対象を容易に定式化できる。しかし、現実には利用者によって待つことができる時間が異なり、予約を出すタイミングや場所も日々変化することから、利用者の行動とそれに対応した車両の動きが非常に複雑で不確実になるのである。

以上のように、社会システムに含まれる複雑さや不確実さは、全体の定式化を行うことを難しくするが、一方でそのような複雑さや不確実さが大きな影響を与えるような問題を対象として扱うためには、この複雑さ・不確実さと向き合う必要がある。そのためには、まず複雑さ・不確実さを含んだ社会を工学的に扱える手法が必要となる。そのような複雑さ・不確実さの存在する社会の分析に適したアプローチの一つである、マルチエージェント・シミュレーション (MAS) について紹介する。

2. 不確実な社会をシミュレートする

2.1 社会シミュレーションとしての MAS

マルチエージェント・シミュレーション (MAS) とは、自律的に振る舞う「エージェント」を定義し、あるシステム内における多数のエージェントの振る舞い

ふじがき ようへい, さかひら ふみひろ, もり としかつ
株式会社構造計画研究所
〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3

をシミュレートすることで、システム全体の振る舞いを観察・解析するボトムアップ的なアプローチである。人間社会や生態系など、自律的に行動する主体が引き起こす現象の分析に適しており、人間以外でもさまざまな生物や組織などをエージェントとして設定することができる。

MAS では、エージェントの個性を属性として定義するとともに、周囲のエージェントとの相互作用や環境・状況に応じて行動を変化させる法則を行動ルールとして定義する。この属性や行動ルールを分析対象に応じて設定することにより、個人ごとに価値観が異なり、個人内でもさまざまな要因に応じて行動が変わる「多様性」や、多くの人や物が場合によっては局所的に影響を及ぼし合う「相互作用」を表現することが可能である。

MAS による「社会シミュレーション」は、エージェントを人や車などとし、仮想的な社会をコンピュータ上に再現しシミュレートするものである。多数のエージェントから構成される社会をコンピュータ上でシミュレートすることで、施策に対する社会全体への効果などを客観的に把握することができる。

MAS には、一度のシミュレーションでさまざまな観点での指標を算出可能であり、計算過程の可視化も容易であるという特徴がある。この特徴は、合意形成や議論の材料として結果を提示する際にも大きなメリットになる。たとえば、それぞれのステークホルダーが気にしている評価指標をすべて算出し、施策案ごとに各評価指標のバランスを比較することができる。また視覚的な表現により結果への理解を促進することができる。

2.2 MAS 構築を助けるパッケージソフト artisoc

MAS は「多様な価値観を持ち、自律的に動く主体間の相互作用」を再現できるため、さまざまな分野での分析に MAS のアプローチを適用できると考えられる。また、社会を分析するうえで必要な人の行動に関する知見は、数理学や情報科学に限らず、人文科学や社会科学のさまざまな分野に存在するため、分野間の連携により MAS の活用可能性は広がると思われる。

しかしながら、MAS などのコンピュータシミュレーションを扱うためには、一般的にプログラミングの知識が必要となる。プログラミングに詳しくない分析者や、プログラミングに時間を割けない分析者にとっては MAS を構築することは容易ではない。MAS を多くの分野で活用するためには、MAS 構築の負担を軽減し、どのような分野の人でも使いやすいシミュレ

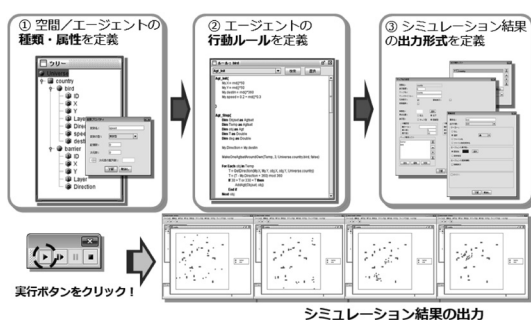


図 1 artisoc でのモデル構築の流れ

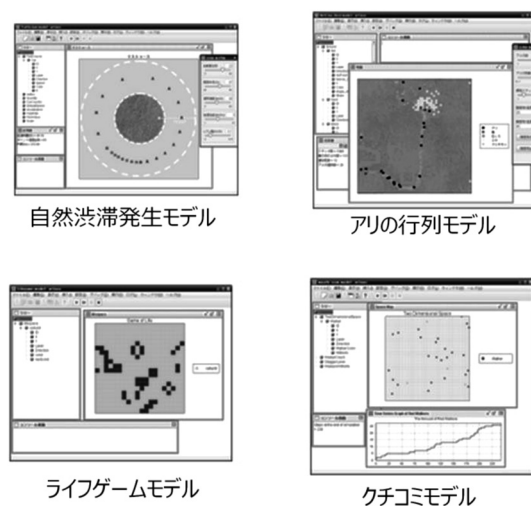


図 2 サンプルモデルの例

シヨンのプラットフォームが必要となる。

そこで、多くの人に使いやすく簡単に MAS を構築できることをコンセプトとしたシミュレーションプラットフォーム「artisoc (アーティソック)」を構造計画研究所と東京大学 山影進教授 (現青山学院大学教授) が共同で開発した。artisoc を利用することで、MAS 構築のための負担を大きく軽減することができ、分析者はエージェントの行動のモデル化、評価指標の検討などに注力することができる。

artisoc では、GUI 操作によって空間やエージェントの種類や属性を定義できる。また、結果の出力についても、空間的な位置を可視化するマップ画面や、リアルタイムで指標の推移を表現するようなグラフ、数値のファイル出力などさまざまな形式の出力を GUI で簡単に設定できる。エージェントのルールは学習が簡単な VisualBasic に似た言語で行うことができ、柔軟なルール設定が可能である。artisoc でのモデル構築の流れを図 1 に示す。

artisoc はこれまでに、多くの大学や研究機関において使用された実績があり、研究報告やサンプルモデルが MAS コミュニティ (<http://mas.kke.co.jp/>) で紹介されている。サンプルモデルの例を図 2 に示す。

本稿では、artisoc の特徴を簡単に紹介したが、詳細な操作方法については、体験版の CD-ROM も付属している入門用の書籍である『人工社会構築指南』[2] を参照していただきたい。

このように MAS 構築を支援するツールが整備され、以前よりも社会シミュレーションを行うことに対するハードルは低くなってきていることから、最近ではさまざまな分野での研究において MAS のアプローチが導入されるようになってきている。

3. よりよい解を求めるために

MAS は、あらかじめ設定した複数のシナリオ条件の下での結果を比較することで、望ましいシナリオ案を検討するためのツールとして活用することができる。しかし、あらかじめ準備された案について、どの案が適しているかを比較・検討することはできるが、必ずしも最適な案を導き出せるわけではない。

一方で最適化に関する基準が明確で、ある施策案に対して、どのような結果が出るかという関係が整理されていれば、特定の基準に沿っての最適化をする技術や、最適な解を探索するような最適化手法が多く側の面から研究され、また利用されてきている。

そこで、MAS で複雑さや不確実さを考慮して施策案と評価指標の関係を整理したうえで、その評価指標の下での最適解を最適化手法で探索することで、効率的に最適な施策案を探索、発見することができると考えられる。また、最適化の基準として用いている指標以外にも、意思決定の際に考慮すべき指標があれば、他の指標も合わせて見比べたうえで意思決定することが望ましい。MAS では多様な指標の算出ができるた

め、特定の基準に従って部分的に最適化された状態での、他の基準での望ましさも評価でき、多様な指標を用いた検討が可能になる。また、その状態に至るまでの過程を可視化することも可能であるため、最適な状況を、視覚的に説明・理解することも可能である。

このような MAS と他手法を組み合わせた具体的な分析の具体的な事例を 4 節と 5 節でそれぞれ述べる。

4. 充電ステーション配置計画への応用例

4.1 充電ステーションの配置計画問題

現在の電気自動車（以下、EV）の航続可能距離は、搭載可能な電池容量の都合上、一般的なガソリン車の航続可能距離に比べて短い。このことから、長距離移動に電気自動車を利用するためには、途中経路での充電が必要になる。そのため、EV の利便性を向上させるためには、充電ステーションを適切に配置することが重要な課題となっている。しかし、EV の充電需要には、EV の移動パターンや電池の減り方など多くの要因が複雑に影響するため、ある配置に対する需要や効果を評価することは容易ではない。

そこで、電力中央研究所と構造計画研究所は充電ステーション配置を検討するための EV 交通シミュレータ「EV-OLYENTOR」[3] を開発した。EV-OLYENTOR では、ある充電ステーションの配置シナリオの下での EV の走行および充電行動を MAS でシミュレートすることで、充電ステーションの利用状況および電池切れ発生状況を評価することができる。また、ある充電ステーション配置シナリオでの状況を評価するだけでなく、より望ましい充電ステーションの配置を自動で求める適正配置アルゴリズムも内蔵している。これにより配置計画策定を支援することができる。

EV-OLYENTOR における MAS と探索手法の関係を図 3 に示す。EV 交通シミュレーションの実行と、

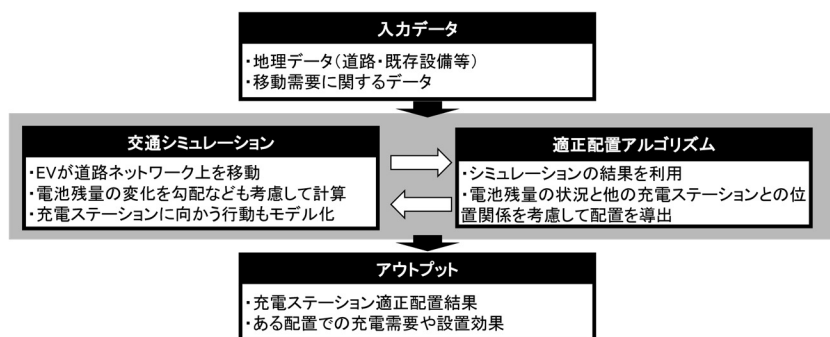


図3 EV-OLYENTOR の入出力とシミュレーション・適正配置アルゴリズムの関係

充電ステーションの適正配置アルゴリズムを繰り返し適用することで、最終的に適切な充電ステーションの配置を探索していく。

4.2 各EVの行動パターン

シミュレーション内で移動するEVエージェントは、シナリオに基づいて出発地と目的地が設定され、経路の探索を行う。出発後は、走行距離や道路勾配、エアコンなどの補器利用に応じて電池を消費する。電池残量が一定の閾値以下になると、目的地よりも近い地点に充電ステーションがあれば、充電ステーションへと向かうといった充電行動を行う。充電ステーションでは、先に到着したEVの充電待ちや電池残量と充電電力に応じた時間で充電を行う。充電が完了したEVは、再度目的地に向かって走行を開始する。

EVのパラメータとしては、搭載電池容量、走行燃費、補器消費電力、充電行動を開始する電池残量閾値などを設定できる。また、充電ステーションのパラメータとしては、充電電力や設置充電器数（同時充電可能台数）、営業時間などを設定でき、充電ステーションごとの設備の違いを考慮したシミュレーションの実施も可能である。

EVの行動の多様性を表現する移動パターンについても、入力ファイルの移動パターン関連データ（トリップ長や出発時刻の分布などのデータ）を調整することで柔軟に設定できる。そのため、現在のEVの移動パターンだけでなく、将来の状況を想定したシミュレーションも可能である。

4.3 多様な評価指標の算出

EV-OLYENTORのEV交通シミュレーションでは、利用者の視点や充電ステーション運営者の視点からの多様な評価指標を算出することができる。

利用者視点での評価指標としては、「電池切れ発生率」や「電池切れ発生分布」に加えて、「EVの走行距離」や「充電ステーションでの待ち時間」などを出力できる。

運営者視点での指標としては、「充電ステーションの時間帯ごとの利用状況」を評価することができる。また、その利用状況を考慮して、充電ステーションごとのどの程度の需要があるか、また充電設備をどの程度配置すればよいかといった運営上の問題も、シミュレーション結果を用いて検討することができる。

ユーザはこれらの指標に基づき、どのような配置が最もよいかの検討を行うが、可能であれば「よい案」を自動で導き出しユーザに提示されることが望ましい。

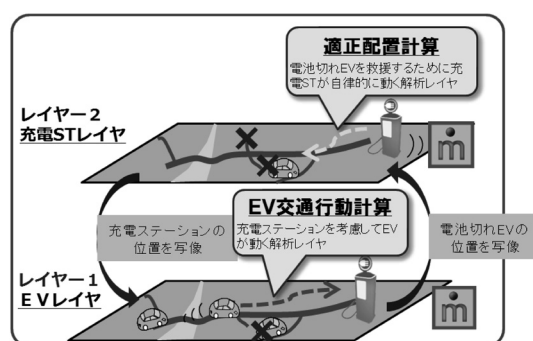


図4 適正配置計算の概念

4.4 シミュレーションと適正配置アルゴリズムの連携

EV-OLYENTORには、前述のとおりシミュレーションの結果から得られたEVの電池切れ発生状況と、すでに配置されている充電ステーションからの距離などを用いて、設置する充電ステーションの位置を調整する、充電ステーション適正配置機能がある。

適正配置計算の概念を図4に示す。まず、対象とする地域での1日のEVの交通シミュレーションを「EVレイヤ」で実行する。その際に、電池が切れた地点をプロットする。次に、「充電ステーションレイヤ（充電STレイヤ）」において1日分の電池切れ発生分布および充電ステーションの間隔などに基づき適正配置アルゴリズムにより充電ステーションの位置を決定する。その後、更新された充電ステーションの位置をEVレイヤに反映し、再度EVの交通シミュレーションを行う。充電ステーション位置を変更することでEVの行動も変化し、電池切れを起こす地点も変化するため、これを繰り返し、最終的に電池切れ発生率が変化しない状況における充電ステーションの配置および箇所数が適切な配置としている。

4.5 実際の分析事例の紹介

淡路島を対象とした計算例について紹介する。この例では、淡路島全域において一日当たり3,000台のEVが走行するという状況を想定し、充電ステーションの適正配置を行った。初期配置は全ステーションが同一箇所にあるものとし、適正配置アルゴリズムによって電池切れ発生状況に合わせて適正配置場所を算出した。適正配置する充電ステーションの数を4カ所と設定し、適正配置アルゴリズムを用いて配置の見直しを行った場合の配置の変化と、ステーションの数をそれぞれ1, 3, 5, 7カ所とした場合の電池切れ発生率の推移を図5に示す（図中の「ST」はステーションの略である）。

適正配置アルゴリズムを実行することで、特に5カ

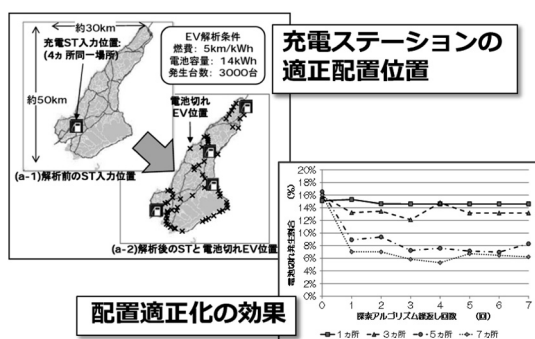


図5 配置の変化と適正配置の効果

所、7カ所の場合には大幅に電池切れ発生リスクが減っており、効果的な配置が探索できていることが確認できた。

5. 乗合タクシーサービス最適化への応用例

5.1 分析の目的と概要

乗合タクシーの最適料金・サービス設計を対象として、MASの結果を用いて料金の最適化を行った分析例を紹介する。

近年、複数の利用者で乗り合い、利用者の希望する発着地と発着時刻に合わせて柔軟に経路や運行時刻を調整する「乗合タクシー」「デマンドバス」などの柔軟な公共交通が、効率性と利便性を兼ね備えた交通手段として国内外で注目されている。このような柔軟な公共交通は、国内では公共交通が不便で交通需要が少ない地域に導入されている事例が多くある。そのような地域では数時間に1便程度の運行となっている地域が多い。一方、地方都市の中心部や都市圏の郊外団地など、ある程度交通需要があるものの公共交通の利便性が高くない地域に対しても、乗合タクシーなどの柔軟な公共交通が有効であるという指摘がなされている。そのような地域では利用者数が多いために多くの台数を走らせても採算が取れるため、予約なしで移動したいと思った際に配車依頼を出しても、待ち時間が10分や20分程度で済むような利便性の高いサービスを実現できる可能性がある。一方で、柔軟な公共交通では運行時間や運行経路の定まっているバスなどとは異なり、利用者の時間的、空間的分布が待ち時間や所要時間に大きく影響するため、投入台数と利用者数、利便性の関係を把握することは容易ではない。そこで、藤垣ら[4]の研究では、MASを用いて利用者の発着地や出発時間帯の特性を考慮したシミュレーションを行い、そのシミュレーション結果を利用して料金・台数設定と、待ち時間が安定する利用者数の関係性を整理し、料金

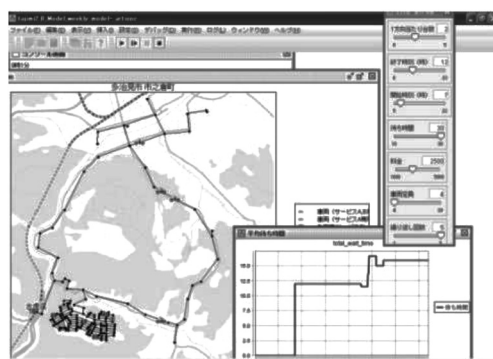


図6 シミュレーション画面の例

や投入台数の最適化を行った。

5.2 MASを用いた運行シミュレーションの構築

利用者の発着地や発生時間帯の特性を考慮して、利用者数と待ち時間の複雑な関係を把握することを目的として、artisocを用いて運行シミュレーションの構築を行った。利用者の発着地や発着時間帯は、分析対象地域で実施したアンケート調査データに基づいて設定されている。シミュレータの画面の例を図6に示す。

5.3 シミュレーション結果を用いたサービス最適化

MASにより、複雑な利用者数と待ち時間の関係を測定することができるため、それらのデータを用いて利用者数と待ち時間の関係を関数にフィッティングし、その関数を用いて利益を定式化することで、収入面での最適化を行った。

以下に、MASの結果を用いて利益の定式化を行う具体的な手順を述べる。待ち時間が重要なサービスの利便性を決める要素である場合には、利用者数によって待ち時間が変化し、また待ち時間によっても利用者数が変化するため、利用者数と待ち時間の間に相互依存関係が存在すると考えられる。そこで、安定する利用者数および待ち時間を、均衡利用者数、均衡待ち時間、として定め、その均衡点をシミュレーションの結果を用いて算出した。算出には、達成される待ち時間を利用者数の関数として表現した「パフォーマンス関数」と、利用者数を待ち時間の関数として表した「需要関数」の二つの関数を用いる。この二つの関数の交点がある待ち時間の際に期待される利用者数と、ある利用者数の場合に実現できる待ち時間が一致する点であり、利用者数と待ち時間が安定すると考えられる「均衡点」である。実地域の分析に対しては、需要関数は想定するサービスの利用意向に関する調査結果から推定した利用選択モデルを使用する。パフォーマンス関数の推定には、MASでのシミュレーションの結果を

用いている。時間的・空間的な多様性のある利用者発生分布と、需要に応じて動く乗合タクシーの運行ルールを考慮するための手法として、ここでは MAS を活用している。

ここで、均衡待ち時間および均衡利用者数は料金と台数に依存するため、サービスの収益は、料金と台数および費用の原単位を考慮して次式で求まる。(均衡利用者数を料金 f と車両数 n の関数として $p(f, n)$ とおき、車両の台数を n 、1 台当たりの経費を c とおく。)

$$U = f * p(f, n) - nc$$

なお、具体的なパフォーマンス関数や需要関数として用いる関数によって、最適解を求める手法は異なるが、以上の方法で料金と均衡時の収益の関係を整理することで、収益の最大化に向けた計算が可能になる。

実際に藤垣ら [4] の研究では、岐阜県多治見市での調査データおよびシミュレーション結果を基に、単純な関数を仮定したうえで、上記の関係をを用いて収益が最大となるような料金および台数を推計している。

6. まとめ

本稿では、複雑で不確実な社会のさまざまな課題と

向き合い、より多くの人が納得できるような解を考えるための一つの手法として MAS を紹介するとともに、最適化手法と MAS を組み合わせることで、複雑さや不確実さを柔軟に考慮しつつも効率的に最適な解を探索、発見する手法の可能性および事例について紹介した。

MAS の応用分野は近年ますます広がっており、今後もさまざまな社会課題に対して、多くの人が納得できる解を見つけ出すための手法として MAS が活用できると考えられる。本稿を通して、MAS というアプローチに、少しでも可能性を感じ取っていただければ幸いである。

参考文献

- [1] 生天目章, 岩永佐織, 佐藤浩, “マイクロ・マクロ・ループによる自己組織性とその評価,” システム／制御／情報, **46**, pp. 561–568, 2002.
- [2] 山影進, 『人工社会構築指南 (シリーズ人工社会の可能性 1)』, 書籍工房早山, 2007.
- [3] 日渡良爾, 岡野邦彦, 池谷知彦, 所健一, “充電インフラ検討用次世代自動車交通シミュレータの開発—電気自動車用急速充電ステーションの適正配置機能—,” 電力中央研究所研究報告書 (電力中央研究所報告), 2011.
- [4] 藤垣洋平, 高見淳史, 大森宣暁, 原田昇, “高利便性乗合タクシーサービスの均衡分析と収益最大化手法,” 交通工学論文集 (特集号), **1**(2), pp. A-133–A-141, 2015.