

大規模マルチエージェントシミュレーションに基づく 社会システムデザインの可能性

服部 宏充^{†a)} 十見 俊輔^{††} 中島 悠^{†††}

Exploring Potential for Social System Design Using Multi-Agent Simulations

Hiromitsu HATTORI^{†a)}, Shunsuke JUMI^{††}, and Yuu NAKAJIMA^{†††}

あらまし 本論文では、マルチエージェントシミュレーション (MASim: Multi-Agent Simulation) に基づいて、異種社会システムを統合した社会システムをデザインする方法を提案する。具体的に交通シミュレーションと電力流通シミュレーションを接合した MASim 環境を構成し、電気自動車を通じて太陽光発電の余剰電力を都市内に流通させる仮想社会システムのシミュレーションを行い、未知社会システムの事前検証のための MASim の利用可能性を問う。ここでの課題は、人間の行動を模擬するエージェントが、交通においては電力流通への貢献も考慮に入れながら交通行動を変化させ、電力流通においては交通状況に応じて電力流通への貢献を変化させるといった様に、システム横断的に人間の行動が介在することによる、システムの複雑な挙動に対処する方法にある。この課題に対し、近似解法を援用したシステムデザインの漸次的な更新と、各デザイン下での MASim による集団挙動の評価を繰り返し、準最適な社会システムデザインの自動獲得を試みる。実験により、社会システムのデザインツールとしての MASim の有用性を示す。

キーワード マルチエージェントシミュレーション, 社会システムデザイン, 交通シミュレーション, 遺伝的アルゴリズム

1. ま え が き

現代の都市は、多種多様な社会システムが複合した大規模複雑系であり、動態の予測は困難である。住み暮らす人々に安心と快適を提供し、社会に効率をもたらす都市規模のシステムデザインは人の計算能力を越えている。この課題に対して、マルチエージェントシミュレーション (MASim: Multi-Agent Simulation) [1] による接近が可能である。例えば、都市交通システムの理解・分析のための交通流の模擬や [2], [3], 家庭用蓄電池の普及を想定したスマートグリッドにおける電力マネジメント効果の分析など [4], 人間の行

動・意思決定が介在する社会システムの理解が試みられている。また、都市における避難計画支援のための人流シミュレータの提案や [5], [6], 街全体のスマート化 [7], [8] を狙い、シミュレーション技術を利用する試みもある。これらの既存研究にみられるように、新たな社会システムを設計する際に、潜在する問題の発見や施策の事前検証の手段として MASim を利用する事は有用と考えられる。

本論文では、MASim に基づいて、異種社会システムを統合した新たな社会システムをデザインする方法を提案する。MASim を利用した複雑な社会システムデザインの可能性を示すため、交通シミュレーションと電力流通シミュレーションを接合した社会シミュレーション環境を構成し、電気自動車 (EV: Electronic Vehicle) を介して太陽光 (PV: Photovoltaic) 発電の余剰電力を都市内に流通させる仮想社会システムのシミュレーションを行う。未知社会システムの事前検証のための MASim の利用可能性を問うのである。ここでの課題は、人間の行動を模擬するエージェントが、交通においては電力流通への貢献も考慮に入れな

[†] 立命館大学情報理工学部, 草津市

College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University, Kusatsu-shi, 525-0058 Japan

^{††} 楽天株式会社, 東京都

Rakuten Inc., Setagaya-ku, Tokyo, 158-0094 Japan

^{†††} 東邦大学理学部, 船橋市

Faculty of Science, Toho University, Funabashi-shi, 274-8510 Japan

a) E-mail: hatto@fc.ritsumei.ac.jp

DOI:10.14923/transinfj.2016JDP7062

がら交通行動を変化させ、電力流通においては交通状況に応じて電力流通への貢献を変化させるといった様に、システム横断的に人間の行動が介在することによる、システムの複雑な挙動に対処する方法にある。筆者らは、この課題に対し、近似解法のプロセスに則ったシステムデザインの漸次的な更新と、各デザイン下でのエージェントシミュレーションによる集団挙動の生成と評価を繰り返し、準最適な社会システムデザインの自動獲得を試みるアプローチを採る。実験による分析を通して、社会システムのデザインツールとしてのMASimの有用性を示す。

2. 電気自動車による太陽光電力流通シミュレーション

2.1 EV と PV 発電の普及と影響

経済産業省は、2030 年に新車販売のおよそ半分を電動車両とする事を目標に設定している [9]。電力供給等の課題はあるが、環境性能の高さやコンパクトシティなど都市設計政策との関係から、EV・PHV の一層の普及が望まれている。一方、PV の普及に関しては、各国においてグリッドパリティの達成に向けた意欲的な目標が掲げられており、今後の更なる普及が期待できる [10]。ただし、PV の普及率向上によって余剰電力の問題が顕在化する。PV の集中連系は、配電系統への逆流（逆潮流）を引き起こして電力品質を悪化させるため [11]、コストを要する出力抑制などの対策が必要になる。その結果、本邦では PV 電力の買い取りに困難が生じつつある。

EV を電力系統へ接続する (V2G: Vehicle-to-Grid) ことで、電力の安定供給や、再生可能電力導入の低コスト化への貢献を提言した先駆的研究がある [12]。EV の車載バッテリーをバッファとするピークカットや、再生可能電力の不安定な出力の安定化の解消手段として EV を利用するメリットを主張する試みである。この試みを手がかりに、筆者らは、V2G による PV 電力の流通を行う仮想の社会システムを構想した。EV の車載バッテリーを介した電力流通では、流通経路や流通機会が、エネルギーの運び手となる人間の行動や意思決定に依存するため、その電力流通システムとしての挙動は定かではない。そこで、分散して発生する余剰の PV 電力を、EV を介して柔軟に集約・分配する利用者参加型の電力流通システムがどのような結果を産み、またどのような条件がシステムの運用効率を向上させるかを MASim によって検証する事とした。

2.2 シミュレーションの概要

図 1 にシミュレーション環境の概要を示す。本シミュレーションでは、自宅をはじめとする施設（人工建造物）での電力利用と EV の走行を電力消費要因、そして系統電力と PV 電力を電力供給源とする。個々の EV は自宅や会社、スーパーマーケット等を要素とする起終点表 (OD 表)、各々の電力需要、余剰電力等に基づいた行動計画を日ごとに決定し、計画に従って行動する。余剰となった PV 電力は、EV を介して流通する。具体的には、余剰電力をもつ EV（供給者）及び充電余力をもつ EV（需要者）が車載電力交換サイトに立ち寄り、サイトの蓄電池を介した充放電を行うことによって、需要者と供給者の間での電力の授受を実現する。なお、十分な電力が蓄電池に蓄えられていない場合は、系統電力を引き込み充電する。通常、余剰の PV 電力の発生が予想される場合、各供給家では、自発的に発電量を抑えるか、または電力品質低下の要因となる逆潮流をさせる事になる。本シミュレーションでは、家庭間で電力の融通を可能とする、いわばエネルギーのシェアリングを実施する事で再生可能電力の偏在を解消し、1) 系統電力の引き込み量の削減、及び 2) 逆潮流する PV 電力量の抑制を実現するためのシステム要件の探索を試みる。

そのためには、各家庭の電力消費量、余剰電力の提供行動などに関するエージェントの活動の境界条件、及び充放電インフラの設置方式など、システムを構成

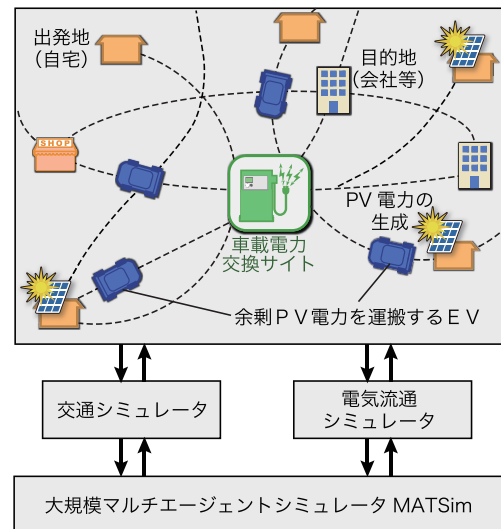


図 1 都市内 PV 電力流通シミュレーションの概要
Fig.1 Overview of city-wide PV-power distribution simulation.

する多種多様な条件について調整が必要であり、そのベストミックスを得る事が難しい。そこで、個の行動を模擬するエージェントに基づいた大規模シミュレーションによる仮想社会を関数として、システムデザインの価値を評価し、より良い社会システムのデザインを得る方法を検討する。

図 1 に示すとおり、本シミュレーションは、大規模マルチエージェントシミュレータ MATSim [3], [13] を基盤とする交通シミュレータと電気流通シミュレータの統合シミュレーションとして実現される。筆者らは、細粒度の行動モデルをもつエージェントの行動を大規模に集積することで広域の交通現象を計算する交通シミュレータを開発しており（設計の詳細等については文献 [14], [15] に譲る）、本論文で用いるのはこの既開発の交通シミュレータである。本シミュレータでは、基盤とした MATSim の方式を継承し、道路ネットワーク上の道路リンク（通常、交差点を区切りとした道路区間が対応する）に対し、リンクの交通容量と同容量のエージェント格納用キューを割り当て、エージェントの移動をネットワーク構造に従ったキュー間の遷移として表現する。例えば、道路区間に過剰な車両の侵入が続くと、キューが埋まっていき、徐々にリンクされたキュー間での遷移も不能となっていく。このようにして、道路ネットワークを介して後方に伝播していく渋滞現象を計算できるなど、本シミュレータは広域の交通現象を再現する性能をもつ。更に、道路ネットワーク上では単なるキュー間の遷移として表現される道路区間内での詳細な走行を再現するため、細粒度の運転行動・意思決定を行う機能を組み込んで、エージェントは、周辺的环境情報と個々の行動特性に基づいて時々刻々の行動を実行できる。例えば、個々の車両に関して、前方車両の速度に基づく速度調整や追い抜きといった細かな動作が実行できる。これにより、車両特性（*e.g.*, ガソリン車, EV）や、交通状況・交通法規に対する反応（*e.g.*, 法定速度に基づく速度調整）など、車両や人間の運転者が備えた個別性を陽に取り入れた交通シミュレーションが可能となっている。

電気流通シミュレータは、系統電力の引き込み量、PV 発電量、走行中の EV や家庭における時々刻々の電力消費の計算を行う。本シミュレータは、交通シミュレータとイベント駆動で連携し、例えば、交通シミュレータから送信された、車載電力交換サイトでの停車を知らせるイベントメッセージを受信すると、該当する EV との充放電処理を開始する。

以上のとおり、本論文で用いるシミュレーション環境は、交通と電力という異なる社会システムにまたがって実行される個々の行動を集積し、新たな社会制度やシステムに対する社会動態の計算を可能にしている。

3. 進化計算に基づく社会システムのデザインプロセス

3.1 提案手法の概要

本論文では、人手で行うことが困難な、複雑なシステムの挙動を規定する複数条件の組合せの決定を、MASim と近似解法の連携により実現する方法を提案する。提案方法では、まず、対象とするシステムのモデル化と評価関数を定義する。具体的には、社会システムの特徴を表すための属性変数と値域、及びシミュレーションの結果に基づきデザインする社会システムの好ましさを表す定量値を求める関数を決定する。次に、1) 解候補の生成、2) シミュレーションの実行、3) シミュレーション結果の評価から成るプロセスを繰り返す、より評価値の高い解を探索する。

対象とする社会システムの挙動を規定する属性（条件）の集合を C 、個々の属性を c_i と表す。各々の c_i は任意の数の値を取り、 $c_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}\}$ と記す。解候補は、各属性に割り当てられる値のベクトル $\vec{d} = \{v_{im} | v_{im} \in c_i, i = 1, \dots, |C|, j = 1, \dots, |c_i|\}$ として表現される。マルチエージェントシミュレーションは、任意の解候補 $\vec{d}_i$ 、及びエージェント集合 A を入力として、エージェントの行動を計算する。すなわち、 $\vec{d}$ に基づいてシミュレーション環境を設定し、エージェントが個々の行動モデルに基づいて仮想の社会環境下での行動決定とその実行を繰り返す。シミュレーション結果が評価関数に基づいて評価され、 $\vec{d}$ の近傍の新たな解候補を用いて計算が継続される、または求解プロセスが停止する。

解空間が大きくなり、また属性に相互依存関係が存在する場合、一般的には厳密解の計算は困難になる。そこで、本論文では、遺伝的アルゴリズム（GA: Genetic Algorithm）に基づいた近似解法による求解を試みる。ここでは、解候補 $\vec{d}$ を染色体とみなし、そこに内包される情報を基に仮想の社会システムがマルチエージェントシミュレータに展開され、シミュレーションが実行される。シミュレーションが計算した社会動態の評価値によって適応度が決定され、遺伝的アルゴリズムの処理手続きに則った交叉と突然変異によ

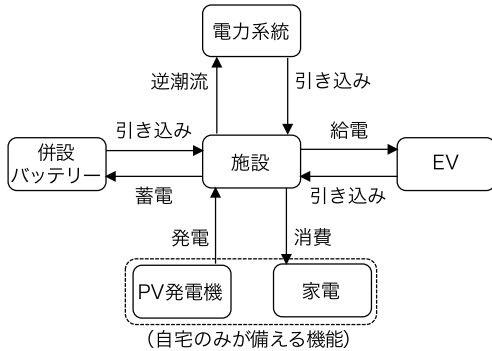


図2 施設（自宅・車載電力交換サイト等）における電力の入出力モデル

Fig.2 I/O model of electricity for buildings.

り、新たな解候補（社会システムのデザイン案）が生み出される。同様の処理の繰り返しにより、良好なシステムデザインの獲得が期待できる。

3.2 モデルの定義

図2は、自宅や車載電力交換サイトといった施設における、電力の入出力モデルを表している。施設では、EVへの給電及び家電等によって電力が消費される。そして、PV発電機からの発電や電力システムからの引き込みに加え、EVの車載バッテリーや施設併設のバッテリーからの引き込みによって電力を得る。現実世界と同様、電力システムからは常に電力の引き込みが可能である。よって、併設バッテリーにはPV電力及びEVの車載バッテリーから引き込んだ電力のみを蓄電可能とする。EVへの給電と家電による消費に対し、施設併設バッテリーの蓄電量が不足した場合に電力システムからの引き込みが行われる。逆に、PV発電によって余剰の電力が生じた場合には、施設併設バッテリーに蓄電する。更に余剰電力が生じ施設併設バッテリーが満充電になると、電力システムへの逆潮流が生じる。ただし、施設の一つである車載電力交換サイトでは、PV発電機による発電や家電による消費という要素は存在しないものとする。

図3は、EVにおける電力の入出力モデルを表している。EVでは、走行時に車載バッテリーから電力を引き込み、モーターで消費する。施設での駐車時には、施設からの充電、または施設への車載バッテリー電力の提供が行われる。施設からの充電は、施設併設バッテリーに十分な電力があるか否かによって異なる。施設併設バッテリーに十分な電力がある場合には、併設バッテリーの電力から引き込む。施設併設バッテリーに十分な電力がない場合には、施設が電力システムから電

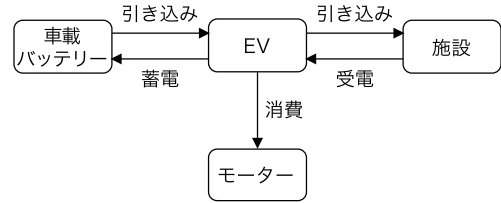


図3 電気自動車における電力の入出力モデル

Fig.3 I/O model of electricity for EV.

力を引き込んだ後、その電力を更にEVが充電する。一方、EVの車載バッテリーに十分な電力がある場合には、EVの車載バッテリーから施設への電力提供が行われる。

3.3 EVによる電力授受ルール

シミュレーションでは、所与の条件下でエージェントが個々に行動を決定し、移動、エネルギー消費、及びエネルギー授受に関する行動を実行する。本シミュレーションでEVの行動を模擬するエージェントは、自身が走行で消費する電力の確保を前提に電力の授受に協力的であると仮定する。具体的には、各EVエージェントはどこからどこへ移動するかを表す行動計画をもち、この計画に基づいて走行に必要な電力量を概算する。各EVエージェントは概算した電力量を維持するように行動する（EVの消費電力の概算については1.に示す）。概算した電力量を維持するという前提の下で、あるEVエージェントは、PV電力の流通システムへの参加を希望し、かつ自宅にPV発電機があり余剰の電力が生じ得るならば、車載電力交換サイトに立ち寄って電力を供給する供給者となる事ができる。一方、家庭にPV発電機をもたず電力に余剰がないEVエージェントは、車載電力交換サイトに立ち寄る需要者となり、車載バッテリーを充電する。その後、充電した電力を家庭にもち帰り消費する。

施設に駐車時の電力授受の行動ルールを以下のとおり定めた。施設に駐車したエージェントは、以下の条件を(1)から順に確認し、最初に当てはまった条件に応じた行動を採ることとした。

(1) 車載電力交換サイトに駐車時、自宅に余剰電力があり、かつ車載バッテリーの電力量が十分なとき、EVエージェントは供給者となる。車載バッテリーから車載電力交換サイトへの電力提供を行う。

(2) 自宅に駐車時、車載バッテリーの電力量が不十分なとき、EVエージェントは自宅から電力を引き込み、車載バッテリーの充電を行う。

(3) 自宅に駐車時、自宅に余剰電力が無く、かつ車載バッテリーの電力量が十分なとき、EV エージェントは車載バッテリーから自宅へ電力提供を行う。

(4) 自宅に駐車時、自宅に余剰電力があり、かつ車載バッテリーが満充電でないとき、EV エージェントは自宅から電力を引き込み、車載バッテリーの充電を行う。

(5) 車載電力交換サイトに駐車時、自宅に余剰電力があり、かつ車載バッテリーの電力量が不十分なとき、EV エージェントは需要者となる。車載電力交換サイトのバッテリーから車載バッテリーへの充電が行われる。

(6) 上記のいずれにも当てはまらないとき、移動目的地がある場合はそこへ向けて出発する。自宅到着後など、移動目的地がない場合は何もせず待機する。これらの条件の下、電力系統からの引き込み量や PV 電力の逆潮流量、車載電力交換サイトでの供給者の放電量と需要者の充電量が計算できる。

3.4 シミュレーションパラメータの定義

本論文で具体例とした、EV による PV 電力流通システムは、社会や各家庭が備える設備、及び人間の行動に関する複数のパラメータによってその挙動が定義される。以下に、各パラメータに関する説明と、本論文で示すシミュレーションにおける設定値や定義域を述べる。なお、パラメータの設定にあたっては、京都市を具体的な都市として想定した。また本論文では、簡単のため、シミュレーション対象の都市空間を、都市の中心地点からの距離に基づく同心円状の三つのゾーンに分け、それぞれを都心部（ゾーン 1）、都心周辺部（ゾーン 2）、及び都市郊外部（ゾーン 3）とみなす。

(1) PV 発電機普及率

PV 電力発電機を備えた自宅数を決めるパラメータであり、社会全体での PV 電力供給量に作用する。本論文では、普及率を 25% に固定し、その状況下での PV 電力の流通の変化を検証する。

(2) PV 発電機配置パターン

都市の各ゾーンにおける PV 電力発電機の設置比率のパターンを表し、PV 電力の供給源に作用するパラメータである。本論文では、地域による設置の偏りを特に与えない事とした。すなわち、ゾーン 1, 2, 3 の比率は (1:1:1) である^(注1)。

(3) PV 電力流通システムへの参加率

EV 所有者のうち、PV 電力流通に協力する所有者の数を決定するパラメータであり、PV 電力の流通量に作用する。本論文では、20%, 30%, 40%, …, 80%, 90% の八つの値を取り得ることとした。

(4) 車載電力交換サイトへの立ち寄り許容距離

PV 電力流通への参加者の協力の度合いを表すパラメータであり、余剰電力の提供のために、本来の最適な走行経路から逸脱して立ち寄る最寄りの電力交換サイトまでの距離の上限を決定する。本論文では、50m, 100m, 150m, …, 1550m, 1600m の 32 通りの値を取り得るものとした。

(5) 車載電力交換サイト設置数

余剰 PV 電力の蓄積量に作用するパラメータである。筆者らが構想したシステム特有の要素であるため、数値の基準を定めにくい。京都市における充電インフラの整備ビジョン^(注2)では京都市内に 140 箇所程度の充電スタンドを設置する予定であり、また、今回のシミュレーション空間は京都市の一部であることから、上限をその半分程度とし、20 基、30 基、40 基、…、70 基、80 基の七つの値を取り得ることとした。

(6) 車載電力交換サイト配置パターン

都市の各ゾーンにおける車載電力交換サイトの配置比率のパターンを表し、PV 電力の収集・分配拠点を決定するパラメータである。車載電力交換サイトの位置は、電力流通に参加する人々の行動に影響を与え得る。そこで、各ゾーンの配置数に偏りを与えたものを考慮する。本論文では、ゾーン 1, 2, 及び 3 の配置比率として、(2:1:1), (4:1:1), (1:2:1), (1:4:1), (1:1:2), (1:1:4), (3:2:1), (1:1:1) の八つのパターンを取り得るものとした。(2:1:1) と (4:1:1) は都心集中型、(1:2:1) と (1:4:1) は都心周辺集中型、(1:1:2) と (1:1:4) は郊外集中型である。それぞれ、集中の度合いが異なっている。また、(3:2:1) は都心集中型ではあるが、郊外へ向けて緩やかに減少するようなパターンである。最後に、(1:1:1) は均一型である。

上記のとおり、PV 電力の供給環境に関する条件は複雑化せず、一方で、人々の行動が介在する、電力授受に関する条件について複数のバリエーションを用意し、エネルギー流通に関わる人々の相互作用による、社会システムの性能への影響評価に重点を置く事とした。

(注1)：都市の外側に向かうほどゾーンの面積が大きくなるため、各ゾーンの PV 発電機の設置密度は下がる事になる。

(注2)：<http://www.pref.kyoto.jp/denkizidouasya/documents/visionlist.pdf>

上述のパラメータのうち、例えば、PV 電力流通システムへの参加率は、その値の操作のためには多様な人々に対する適切な動機付けが必要であり、現実世界でコントロールすることは容易ではない。しかし、そのような現実世界での制約にとらわれず、可能性を検証できる事が MASim の利点である。現実世界では仮定しにくい条件が組み込まれた社会システムの挙動を MASim で検証し、良い結果が得られる可能性があれば、上記のシステム参加率のようにコントロール困難な条件について検討する動機を提示できる。ゆえに、コントロールが困難なパラメータをシミュレーションに組み込み検証する事は妥当なアプローチと考える。

3.5 解の計算プロセス

GA で使用する個体について説明する。前節で述べたパラメータをエンコードし、ある社会システムデザイン案（解候補）を表現する染色体をもつ個体が生成される。各パラメータは社会システムを規定する条件であり、社会的に、より望ましい結果を生み出す条件値集合を得ることが計算の目的である。

本論文では、3.4 で述べたパラメータのうち (1)、(2) は固定であるため、(3)～(6) のパラメータを GA で扱う。(3)、(5)、(6) はそれぞれ 8 通り (3bits) の値を取り得る。(4) は 32 通り (5bits) の値を取り得る。そのため、合計 14bits の染色体でパラメータセットを表現し、3bits, 5bits, 3bits, 3bits ずつに区切り、それぞれ各パラメータに割り当てる。例えば、“00111001100101” で表される染色体は、“{(3),(4),(5),(6)} = {1,25,4,5}” の遺伝子型にデコードされ、そして各パラメータへエンコードされる。

求解のプロセスは以下のとおりである。本プロセスのポイントは、MASim を GA における適応度関数として利用する事で、任意の社会システムデザインの評価を、多数の仮想の人間（エージェント）の行動の集積によって行う点にある。

(1) 複数の個体をランダムに生成し、初期集団とする。各個体がもつ染色体が社会システムのデザイン案を表す。

(2) 各個体から MASim のための環境を生成する。まず、染色体からパラメータセットへのエンコードを行う。染色体の遺伝子が表す情報を基に、シミュレーション環境を初期化する。

(3) 各個体から生成された環境においてシミュレーションを実行する。

(4) シミュレーション結果を任意の社会指標に基

づき評価し、その評価値を GA における適合度 F として扱う。本論文では、車載電力交換サイトにおける供給者と需要者の電力授受のバランスが良いほど適合度 F が高くなるものとして評価関数を設定する。これは、PV 電力流通システムによりバランス良く各地で余剰した PV 電力が授受され、PV 電力が効率良く収集・分配されることが社会的に効用が大きく、好ましいと考えたためである。逆潮流量が減少すれば適合度 F が高くなるように評価関数を設定することも考えられる。しかし、逆潮流量が単純に減少するだけでなく、収集された電力がうまく分配されることが重要であると考えたため、本論文では以下の評価関数を用いる事とした。

$$F = \frac{C}{C - P}$$

C : 車載電力交換サイトにおける EV の総充電量

P : 車載電力交換サイトにおける EV からの総供給量

ここでの総充電量と総供給量とは、全 EV エージェントに関する 1 日の充電量と供給量をそれぞれ総和したものである。ただし、PV 電力によって全ての消費電力を賄えることは現実的に考えにくく、車載電力交換ステーションにおける総充電量と総供給量は総充電量の方が大きくなると考えられる。そのため本研究では、 $P < C$ であると仮定する。この仮定 ($0 < C - P$) により、 F の分子、分母は共に非負であり、また、当然 $C > C - P$ であるため、 $F > 1$ である。以上により、適合度 F は、 C と P の比率が 1:1 に近いほど大きくなり、供給者と需要者の電力授受のバランスが良いほど適合度が高くなる。

(5) 終了条件を満たしている場合は、その時点での最良解を導出されたデザイン案として返す。終了条件には、世代数の上限、MASim の評価回数、適合度 F の目標値の設定などが考えられる。終了条件を満たしていない場合は次へ進む。

(6) 以下の操作を繰り返し、子個体群を生成する。その子個体群から次世代へ引き継ぐ個体群を生成する。

(a) 適合度 F に基づく親個体の選択。

(b) 選択された親個体に対する交叉操作の適用。

(c) 交叉により生成された子個体に対する突然変異操作の適用。

(7) ステップ (2) へ戻る。

4. 実 験

4.1 設 定

4.1.1 道路環境に関連する設定

本論文では、道路ネットワークとして実際の京都市のネットワークを用いて実験を行う。具体的には、京都市の都心部約 10km 四方の領域を対象に、商用の数値地図から約 7000 のノードと約 14000 のリンクを抽出し、道路ネットワークを生成した。本道路ネットワーク上に、車両を模擬するエージェントを走行させる。車両が走行時に従うべき交通施策は多数考えられるが、本論文で対象とする京都市全域で実施されている交通施策を把握し、実装することは現実的には難しい。本論文では、走行速度と追い越しに関連した制約を与える交通施策を簡易な形式で導入する事とした。まず、走行速度に関して、各道路区間に“法定速度”を設定し、各車両エージェントが法定速度以下での走行を行う事とした^(注3)。ここで、本論文で設定する“法定速度”は、現実世界での法定速度を厳密に反映するものではなく、各車両の走行速度に対する上限を与える機能のみをもつものとして、その意味を限定した。具体的に本論文では、一律 8.33m/s (= 30km/h) をシミュレーションにおける法定速度として設定した。また、追い越しに関して、追い越し車線と走行車線の区別を各道路区間に設定し、各車両が追い越し車線でのみ前方車両を追い越す事を可能とした。具体的には、片側複数車線の区間においては、最右車線を追い越し車線として利用可能とし、エージェントにもその判断機能の組み込みを行った。ところで、交通信号については、個々の信号機に対して素朴な制御方式を設定する事を仮定するとしても、隣接する信号機を考慮した信号の切り替え制御のタイミングについては考慮せざるを得ない。しかし、都市内の全ての信号を対象として、シミュレーションに不具合が生じない妥当な制御のタイミングを設定するのは非常に困難であり、また信号制御の影響を考慮したシミュレーション結果の分析も難しくなる。都市規模での信号制御モデルの構築は、本論文で扱うべき範囲を超えると考え、本論文では信号を設置せず、交差点を常時通過可能として、信号制御の影響を排して分析を行う事とした。

4.1.2 車両に関連する設定

本実験では車両は全て EV とし、9000 台の場合と 20000 台の場合の 2 通りの実験を行う^(注4)。EV エージェントに対しては、2000 年に行われたパーソントリップ調査結果を基に生成した OD を割り当てた。調査結果から行政区間の移動車両数、及び各行政区での 1 時間単位での出発車両数を読み取り、それに基づき、各 EV の出発地点と出発時刻を設定した。なお、行政区内での出発地点の決定は、乱数に基づく道路リンクの選定によって行いが、本論文では分析の簡単のため、乱数のシードを固定し、全てのシミュレーションで同じ OD となるよう設定した。

各 EV エージェントは出発地 (e.g., 自宅) と目的地 (e.g., 勤務地、スーパー等) へのペアをもち、まず、出発地から目的地へ移動する。目的地到着後に数時間目的地に滞在し、次に、出発地と目的地を入れ替えて移動する事で、2 点間の往復移動を行う。

自宅の PV 発電機や併設バッテリー、EV に関するパラメータに関しては、文献 [10], [16] を参照して設定する。なお、**3.2** でも述べたとおり、本論文では PV 電力の供給環境を変化させない事を一貫するため、全ての PV 発電機の性能は同一とし、天候による日ごとの発電力の変化は考慮しない。具体的な設定は以下のとおりである。本論文では、24 分割した 1 日の各時間帯における発電効率を表 A・1 の発電効率欄のとおりとする。同様に、自宅における各時間帯での消費電力も表 A・1 の消費電力欄のとおりとする。PV 発電機が設置された自宅のみがもつ併設バッテリーの容量は 5kWh とする。EV の車載バッテリーの容量は 20kWh, 50kWh, 及び 100kWh の 3 種類とし、各々の容量に対する台数の比率を 1:3:1 とする。

4.1.3 電力の授受に関連する設定

本論文で行うシミュレーションでは、単位時間ごとの交通行動と電力消費行動に関する計算が繰り返行われ、この電力消費行動に関する計算の中で、**3.2**、及び **3.3** で述べた電力の授受に関するモデルとルールが反映される。例えば、EV が車載電力交換サイトに到着した場合を考える。**2.2** の概要で述べたように、交通シミュレータにおいて EV が車載電力交換サイトに停車すると、電氣流通シミュレータにイベン

(注3)：現実の交通環境では、必ずしも全ての車両が法定速度以下で走行しているわけではないため、この設定は現実との明らかな乖離を生むが、無効な走行車両の影響評価は本論文の範囲外である。

(注4)：現実には全車両が EV である状況は考え難いが、本実験では、仮想する PV 電氣流通システムに対して、EV 以外の車両が直接的な影響を与える状況を想定しておらず、システム不参加の EV と陽に区別する必要がない。そのため、設定の簡単のため、全車両を EV としている。

トメッセージが送信される。メッセージ受信後、まず 3.3 のルールに従い、充電または放電の実行が決定される。そして、単位時間ごとに充電/放電の電力量を求め、EV が要求する電力量に達するまでこの計算を繰り返す。この間、交通シミュレータ上での EV は、車載電力交換サイトに電力授受のための停車を継続している状態となる。

本実験では、車載電力交換サイトにおける充電/放電の所要時間を、以下のように計算する事とした。この計算のために、まず、文献[10],[16]のデータを基に充電効率等を勘案し、更に事前のシミュレーションの試行を通じた調整によって、充電/放電の出力を決定した。具体的には、“自宅”では1.0kW/0.6kW、また“車載電力交換サイト”では急速充電を想定し30kW/18kWと設定した。現在主流の家庭用普通充電器の出力は3.0kW^(注5)、充電ステーション用の急速充電器の最高出力は50kWであることから、これらの値の設定に非現実性はないものとする。設定した出力に基づき、例えば、車載電力交換サイトにおいて、EVは10分間で5kWhの電力を充電でき、また3kWhの電力を放電できる。なお、上述のとおり、シミュレータ上では、単位時間ごと（例えば10秒ごと）に充放電量を計算し、EVが要求する電力量に達するまで充放電を継続することになる。このようにして、車載電力交換サイトでの電力授受に関わる所要時間が計算され、交通シミュレータにおける停車時間として反映される。

なお、車載電力交換サイトでは、複数のEVが施設を介して直接電力の授受を行う事はしない。EVは、施設の併設バッテリーのみを給電、または電力の引き込み対象とし、他の複数EVを交えた複雑な電力の受け渡し先の選定は行わない事とする。また、車載電力交換サイトには多数のEVが停車する十分なスペースを仮定し、サイトに同時接続するEV数を制限しない。そのため、電力授受の実行において、他のEVの存在が制約とはならない。したがって、本論文のシミュレーションでは、車載電力交換サイトでのEV相互の影響を考慮する必要はない。

4.1.4 GAに関する設定

本論文では、GAの中でも並列化効率の高い分散遺伝的アルゴリズム(DGA: Distributed Genetic Algorithm)を用いた[17]。DGAでは、処理対象の母集団

を複数のサブ母集団に分割し、そのサブ母集団ごとに遺伝的操作が行われ、一定期間ごとにサブ母集団間での移住が実施される。なお、文献[18]を参照し、DGAに関するパラメータを表A.2のように設定する。

本論文では、分析の便利のため、解空間のサイズを比較的小規模に抑える事とし、世代数の上限を100世代に設定して、これを終了条件とした。

4.2 実験結果

EVが9000台の場合の結果を図4と図6、及び表1と表3に示す。また、EVが20000台の場合の結果を図5と図7、及び表2と表4に示す。

図4と図5に、母集団内の全個体の適合度の最大値と平均値の推移を示す。EVが9000台の場合は、20世代付近で適合度の上昇がいったん落ち着き、その後75世代付近でわずかながら再度の上昇を示した。EVが20000台の場合は、10世代付近で得られた解から大きな改善がないまま計算を終えている。なお、いずれのケースでも、平均値は最大値の上昇にあわせるように上昇する傾向を示した。

図6、図7に、各サブ母集団内の個体における適合度の最大値の推移を示す。図4や図5と同様、解が段階的に改善されていることが確認できる。EVが9000

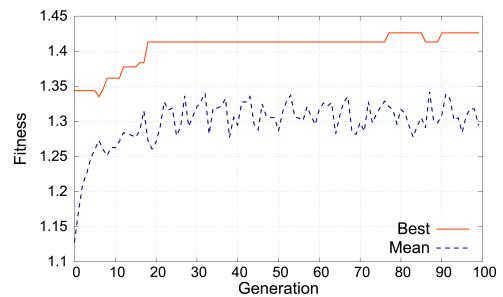


図4 世代に対する適合度の推移 (EV 数: 9000)
Fig. 4 Transition of fitness value (# of EV: 9000).

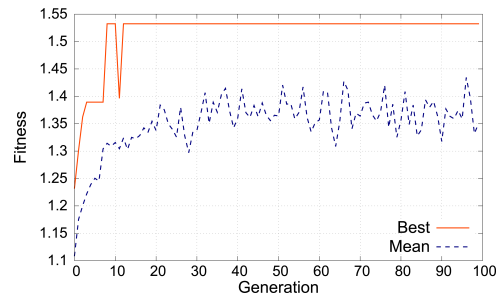


図5 世代に対する適合度の推移 (EV 数: 20000)
Fig. 5 Transition of fitness value (# of EV: 20000).

(注5)：経済産業省 EV・PHV に関する政府の取り組み：
<http://www.chademo.com/wp/pdf/japan/2016GA/2016GA-METI.pdf>

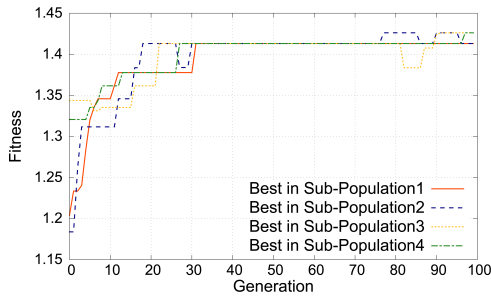


図 6 適合度の最大値の推移 (EV 数: 9000)

Fig. 6 Transition of max. of fitness (# of EV: 9000).

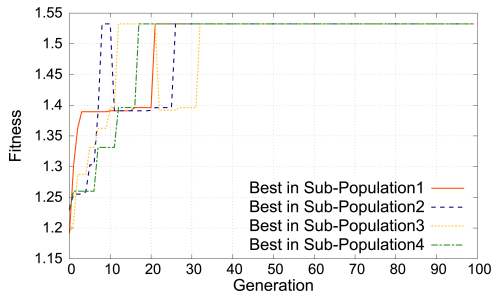


図 7 適合度の最大値の推移 (EV 数: 20000)

Fig. 7 Transition of max. of fitness (# of EV: 20000).

表 1 適合度の最低値/平均値/最高値の比較 (EV 数: 9000)

Table 1 Comparison of min/mean/max of fitness (# of EV: 9000).

パラメータ	最低	平均	最高
PV 電力流通システム参加率 (%)	20	70	90
立ち寄り許容距離 (m)	50	100	50
車載電力交換サイト設置数	30	70	80
車載電力交換サイト配置パターン	(3:2:1)	(1:4:1)	(1:4:1)
適合度	1.016	1.221	1.426

表 2 適合度の最低値/平均値/最高値の比較 (EV 数: 20000)

Table 2 Comparison of min/mean/max of fitness (# of EV: 20000).

パラメータ	最低	平均	最高
PV 電力流通システム参加率 (%)	20	80	90
立ち寄り許容距離 (m)	50	100	50
車載電力交換サイト設置数	50	90	50
車載電力交換サイト配置パターン	(4:1:1)	(4:1:1)	(1:2:1)
適合度	1.026	1.279	1.532

台の場合は、それぞれのサブ母集団が適合度の改善を少しずつ行い、サブ母集団間の個体の移住により良好な解が共有されていることが分かる。一方、EV が 20000 台の場合は、サブ母集団 2 が偶然適合度の高い解を見つけ、その解が移民によって他のサブ母集団に

表 3 適合度の最低値/平均値/最高値に対応する電力関連データ (単位: MWh・EV 数: 9000)

Table 3 Corresponding data of electricity to min/mean/max of fitness (# of EV: 9000).

	最低	平均	最高
車載電力交換サイトにおける EV からの提供電力量	0.08	2.26	1.97
車載電力交換サイトにおける EV への引き込み電力量	4.70	12.49	6.62
車載電力交換サイトにおける系統電力の引き込み量	4.38	6.15	2.66
EV の消費電力量	3.64	3.66	3.64
自宅での系統電力の引き込み量	93.30	93.89	94.29
自宅での逆潮流量	85.44	84.23	84.65

表 4 適合度の最低値/平均値/最高値に対応する電力関連データ (単位: MWh・EV 数: 20000)

Table 4 Corresponding data of electricity to min/mean/max of fitness (# of EV: 20000).

	最低	平均	最高
車載電力交換サイトにおける EV からの提供電力量	0.31	5.98	4.45
車載電力交換サイトにおける EV への引き込み電力量	12.60	27.66	12.80
車載電力交換サイトにおける系統電力の引き込み量	11.82	8.44	2.12
EV の消費電力量	8.20	8.25	8.21
自宅での系統電力の引き込み量	206.95	210.06	209.82
自宅での逆潮流量	187.48	184.34	185.73

共有されており、本論文で採用した DGA が効果的に機能している事が確認できる。

表 1, 表 2 に、提案手法で得られた解のうち、適合度が最低値の解、平均値の解^(注6)、最高値の解のパラメータセットを示す。更に、表 3, 表 4 に、表 1, 表 2 で示した各々の解における電力関連データを示す。本実験では、車載電力交換サイトにおける EV の供給量と充電量の比率が 1:1 に近いほど適合度が高くなる関数を用いた。表 3 と表 4 より、適合度が最低、平均、及び最高の順に、供給量と充電量の比率が改善されていることを確認できる。

系統電力の総引き込み量は、車載電力交換サイトの引き込み量と自宅の引き込み量の総和に相当する。EV が 9000 台の場合、系統電力の総引き込み量は、最低値 = $4.38 + 93.30 = 97.68$ 、平均値 = $6.15 + 93.89 + 100.04$ 、及び最高値 = $2.66 + 94.29 = 96.95$ となっている。つまり、適合度が最高の解では、最低値、及び平均値の解と比べ、それぞれ 0.7%、3.0% の節電ができていることが分かる。同様に、EV が 20000 台の場合、系統

(注6): 実際には適合度の平均に対する最近傍値を与える解。

電力の総引き込み量は 最低値 = $11.82 + 206.95 = 218.77$, 平均値 = $8.44 + 210.06 = 218.5$, 最高値 = $2.12 + 209.82 = 211.94$ となっている。つまり、適合度が最高の解では、最低値、及び平均値の解と比べ、それぞれ 3.1%, 3.0% の節電ができていることが分かる。複数の仮定に基づいて定義された仮想のシステムでの節電率の現実的な意味について議論することは難しいが、文献 [19] では、資源エネルギー庁より、東日本大震災が発生した 2011 年夏の関西電力管内での家庭の節電実績は 4% と報告された事が述べられている。本実験の結果は、この実際の節電率に近い値が提案手法による解の改善により得られた事を示しており、提案手法が、社会によってより好ましいシステムデザインを提示する性能を有する可能性を示唆している。

提案手法によって得られた解が社会のあり方に関して示唆する点についても議論しておきたい。表 2 のパラメータを見ると、高い適合度、つまり逆潮流量が抑制されるためには、車載電力交換サイトを多数設置したり、また遠方への立ち寄りという形で人々に大きな負荷を求めたりするより、むしろより多くの人々に比較的小さな負担での協力を求める（実際に、立ち寄り許容距離は最小値の 50m を示した）ことがより効果を示すとの解釈が可能である。つまり、社会の価値を、多くの人々の小さな行動変容の集積によって向上させる事ができ、そのような行動変容を引き出すため

の、社会システムの巧みなデザインの必要性を示している。このような分析は、個々人の相互作用を陽に計算する MASim の特徴が活かされたもので、MASim を基盤とした本論文の提案手法の有用性を強化するものである。ただし、既述のとおり、本論文で用いた仮想システムは多くの仮定に基づいて定義され、また計算量に関する問題を回避するために操作可能なパラメータも絞り込まれていることから、解の現実的な意味解釈は、本論文では限界がある。

4.3 考察

本節では、社会システムデザインの支援に対する提案手法の有用性を向上させるための方策について議論する。

EV が 9000 台の場合は問題規模が比較的小さいため、全解探索が可能である。その結果を表 5、表 6 に示す。表 5 は、全解のうち、適合度が最低値の解、中間値の解、平均値の解、及び最高値の解に関して、各々のパラメータセットを示している。表 6 は、表 5 で示した解における電力関連データを表している。

EV が 9000 台の場合に提案手法によって得られた近似解（適合度：1.426）は、全解候補の中で 2 番目に適合度が高い解であった。全ての解の数が 16384 個のため、提案手法は全解の上位 0.02% に入る近似解を導出した事になる。少なくとも、この規模の問題に対して、提案手法はうまく機能した事が確認できた。一

表 5 全解探索時の適合度の最低値/中間値/平均値/最適値の比較 (EV 数: 9000)
Table 5 Comparison of min/medium/mean/max of fitness by exhaustive search (# of EV: 9000).

パラメータ	最低	中間	平均	最適
(3) PV 電力流通システム参加率 (%)	20	60	90	90
(4) 立ち寄り許容距離 (m)	50	1000	350	100
(5) 車載電力交換サイト設置数	20	50	30	20
(6) 車載電力交換サイト配置パターン	(1:2:1)	(3:2:1)	(1:1:2)	(1:1:2)
適合度	1.013	1.108	1.220	1.428

表 6 全解探索時の適合度の最低値/中間値/平均値/最適値に対応する電力関連データ (単位: MWh・EV 数: 9000)

Table 6 Corresponding data of electricity to min/medium/mean/max of fitness by exhaustive search (# of EV: 9000).

	最低	中間	平均	最適
車載電力交換サイトにおける EV からの提供電力量	0.06	6.15	6.05	2.73
車載電力交換サイトにおける EV への引き込み電力量	4.66	63.28	33.34	9.21
車載電力交換サイトにおける系統電力の引き込み量	4.37	41.97	9.44	2.68
EV の消費電力量	3.632	3.89	3.74	3.66
自宅での系統電力の引き込み量	93.33	92.79	95.99	94.35
自宅での逆潮流量	85.47	79.93	81.18	84.35

方, EV が 20000 台の場合は, 計算量の制約から全解探索はしておらず, 近似解の品質を厳密に論じる事はできない. しかし, 9000 台の場合と同様に適合度が高い解が得られており, 電力の面でも, 適合度が平均値付近の解に対して約 3%節電できる効果を確認できた. 以上より, 本論文の実験規模では, 提案手法によって良好な結果が得られたと考えられるが, 計算環境の充実によってシミュレーションを更に大規模化した場合, 問題に急激な質的变化(相転移)が起こる可能性がある. そのため, 提案手法による求解能力の限界について, 更なる検証を要する.

また, 得られる解の適合度と, 各々の解におけるシミュレーションパラメータに着目すると, 本論文の実験では, システムへの参加率が高く, 車載電力交換サイトへの立ち寄り許容距離が短いほど良い解である傾向が見られた. したがって, これら二つのパラメータを固定し, 残りのパラメータに関して詳細な探索を行うことで, より良好な解を探索できることが期待される. ここで, 前者の“参加率の高さがシステムにとって益する”事は自然で予測がしやすいが, 後者については, “立ち寄り許容距離が短い”事と解の品質向上の関係性を自然に導出できるとは考え難い. そのため, 解を計算を繰り返す過程で得られた解候補を分析し, 解の品質に対する影響が大きいパラメータを同定するなど, 対象とする社会システムの大局的な性質を解き明かしながら, 有望と思われる解空間を絞り込みシステムチェックに解を精練するよう, 手法を拡張する方法が考えられる.

次に, 提案手法の計算量に関して考察する. 提案手法の環境変数を以下に列挙する.

- 終了条件である世代数の上限 g
- MASim を 1 回実行するために要する時間 t
- 1 度に実行できる MASim のプロセス数 p
- 母集団サイズ s
- サブ母集団数 i

これらの変数に基づき, 提案手法の総実行時間 T を以下のように表せる. ただし, $\text{ceiling}(x)$ は実数 x に対して x 以上の最小の整数を返す天井関数を表す.

$$T = g \cdot t \cdot \frac{s/i}{\text{ceiling}(p/i)} \quad (1)$$

$\text{ceiling}(p/i)$ は DGA における各サブ母集団に割り当てることができるプロセス数であり, サブ母集団において 1 度に $\text{ceiling}(p/i)$ 個の MASim が実行できることを表す. サブ母集団において $\text{ceiling}(p/i)$ 個

の MASim の同時実行を $\frac{s/i}{\text{ceiling}(p/i)}$ 回行うことで 1 世代が終了するため, $t \cdot \frac{s/i}{\text{ceiling}(p/i)}$ が 1 世代に要する時間であり, 提案手法の総実行時間は式 (1) となる. 具体的に, 本論文の実験では EV が 20000 台の場合, $t = 25$ (minutes), $p = 12$, $g = 100$, $s = 32$, $i = 4$ であり, $T \approx 5.2$ (days) であった. 簡単のため p/i が整数になると仮定すると, $T = g \cdot t \cdot \frac{s}{p}$ になる. つまり, T は終了条件である世代数 g , MASim を 1 回実行するために要する時間 t , 母集団サイズ s に比例し, 1 度に実行できる MASim のプロセス数 p に反比例する. t は提案手法によって改善されるものではないため, それ以外の 3 変数について考える必要がある. まず s について考える. s は探索幅の広さを表現しており, この値が大きすぎると, 収束までの時間が大きくなる可能性があり, 逆に小さすぎると, 局所解に陥りやすくなる. 文献 [18] にもあるように, 対象問題の性質によって適切な値の設定が必要であり, 本論文で行ったような, 性質が未知の社会システムを設計する場合には, この値の推定が重要な課題となる. 次に, p について考える. p は計算環境に依存する値であり, 並列計算が可能なスーパーコンピュータやグリッドコンピュータでは非常に大きくなる事が期待できる. GA は高い並列化効率を特徴としており, 並列計算機の活用と相性が良い. 以上の議論から, 提案手法に基づく未知の社会システムの設計のためには, より多くの計算を要する探索幅の拡大が必要となるが, 超大並列計算環境と提案手法を巧みに組み合わせることで効率的に大規模計算が可能となり, 解の品質向上にも繋がると考えられる.

5. む す び

複雑化する人間社会を支えるシステムの適切なデザインは難しい. 人々の行動は, 新たな社会のルールや制度によって様々に変化し得るものであり, それを適切に制御するシステムの形を見出す事は容易ではない. 本論文では, 可能な社会のデザインをシミュレーション環境に展開し, そこで多数の仮想の人間(マルチエージェント)が相互作用した結果を基に社会の有り様を探る, 社会システムデザインの評価装置としてマルチエージェントシミュレーションを位置付けた. そして, 近似解探索手法を利用し, シミュレーションを反復しながら近似解を自動的に獲得する計算プロセスを示した. 実験により, 異種の社会システムが複合する新たな社会システムのデザインを, その品質を追求しつつ獲得できる可能性を示した.

本研究の今後に向けた主たる課題は、より大規模な問題に対して、多数のパラメータとエージェントの行動の組合せを効果的に網羅する方法である。4.3で考察したように、特定のパラメータの値が解の品質に良い影響を与えるといった、対象とする問題の性質を解明できれば、効率的な探索空間の絞り込みに基づきパラメータを網羅するアプローチをとれる可能性がある。また、本論文の提案手法は、並列計算環境の利用による効率の改善が期待できる点について考察した。そこで、例えば文献[20]にあるようなツールを利用し、大規模並列化するアプローチが考えられる。更に、本論文では唯一の評価関数を用いて計算を行ったが、実世界の社会システムは複数の目的をもつと想定する方が自然である。したがって、複数の評価指標を考慮する多目的最適化が可能となるよう拡張することも今後の課題となる。

3.4でも述べたとおり、現実世界ではコントロールが難しく、新たな社会システムの設計において検討対象として考えにくい条件を、シミュレーションに反映し、その影響を検証することができる。これは、MASimの適用が、行政の発想を拡張できる事を意味しており、提案手法の社会的意義を示唆するとともに、その社会応用に関する具体的な検討の必要を示している。

本論文では、交通と電力のシステムを統合するシステムを構想し、シミュレーションを行ったが、筆者らの目的は、このシステムの実用性を問う事ではない。エネルギーという、本邦はもちろん、世界的にも重要な課題を取り扱った社会システムのデザインに対して、MASimが貢献可能である事を明らかにしたい、というのが、本論文で用いた仮想の社会システムに関する筆者らの意図である。したがって、本論文で用いたシミュレーション環境やエージェントのモデル、及び実験における前提の現実的な妥当性については議論の余地はあるが、シミュレーションの現実性の追求は本論文の主たる目的ではない。ただし、実用を目指す上では、シミュレーションの現実性・妥当性の確保は中心的な課題となる。なお、エネルギーに関しては、近年、関連分野でも研究が活発化しつつあり[4],[21]、本論文のアプローチに既存研究を応用する事も検討したい。

文 献

- [1] J. Epstein and R. Axtell, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, MIT Press, 1996.
- [2] H. Hattori, Y. Nakajima, and S. Yamane, "Massive multiagent-based urban traffic simulation with fine-grained behavior models," *J. Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol.15, no.2, pp.233–239, 2011.
- [3] B. Raney and K. Nagel, "Iterative route planning for large-scale modular transportation simulations," *Future Generation Computer Systems*, vol.20, no.7, pp.1101–1118, 2004.
- [4] P. Vytelingum, T.D. Voice, S.D. Ramchurn, A. Rogers, and N.R. Jennings, "Agent-based micro-storage management for the smart grid," *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2010)*, pp.39–46, 2010.
- [5] T. Yamashita, S. Soeda, and I. Noda, "Evacuation planning assist system with network model-based pedestrian simulator," *Proc. 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA-2009)*, pp.649–656, 2009.
- [6] 山下倫央, 副田俊介, 大西正輝, 依田育士, 野田五十樹, "一次元歩行者モデルを用いた高速避難シミュレータの開発とその応用," *情処学論*, vol.53, no.7, pp.1732–1744, 2012.
- [7] 中島秀之, 白石 陽, 松原 仁, "「スマートシティはこたて」の中核としてのスマートアクセスビークルシステムのデザインと実装," *観光情報学会誌*, vol.7, pp.19–28, 2011.
- [8] 中島秀之, 野田五十樹, 松原 仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石 陽, 佐野渉二, 小柴 等, 金森 亮, "バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装," *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, vol.71, no.5, pp.875–888, 2015.
- [9] 経済産業省, "自動車産業戦略 2014," 2014. <http://www.meti.go.jp/press/2014/11/20141117003/20141117003-A.pdf>
- [10] NEDO, "Nedo 再生可能エネルギー技術白書 第2版," 2014. <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>
- [11] 松田勝弘, 和田 勝, 吉川俊行, 渡辺雅浩, 小林広武, "太陽光発電集中連系時における各需要家発電電力量の減少ばらつきの分析とその対策に関する一考察," *電学論 (B)*, vol.126, no.10, pp.1003–1012, 2006.
- [12] W. Kempton and J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *J. Power Sources*, vol.144, no.1, pp.268–279, 2005.
- [13] A. Stahel, F. Ciari, and K.W. Axhausen, "Modeling impacts of weather conditions in agent-based transport microsimulations," *Proc. 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, pp.1–1, 2014.
- [14] 服部宏充, 中島 悠, 加藤 整, 石田 亨, 山根昇平, "大規模マルチエージェント交通シミュレーション," *自動車技術*, vol.64, no.3, pp.38–44, 2010.
- [15] Y. Nakajima, S. Yamane, and H. Hattori, "Multi-model based simulation platform for urban traffic simulation," *Proc. 13th International Conference*

- on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA-2010), pp.228–241, 2010.
- [16] NEDO, “二次電池技術開発ロードマップ 2013,” 2013. <http://www.nedo.go.jp/content/100535728.pdf>
- [17] J. Cohoon, S. Hegde, W. Martin, and D. Richards, “Distributed genetic algorithms for the floorplan design problem,” IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst., vol.10, no.4, pp.483–491, 1991.
- [18] 廣安知之, 三木光範, 上浦二郎, “実験計画法を用いた分散遺伝的アルゴリズムのパラメータ推定,” 情報処理学会誌: 数理モデル化と応用, vol.43, pp.199–217, 2002.
- [19] 西尾健一郎, 大藤健太, “家庭における 2013 年夏の節電の実態,” Technical report, 電力中央研究所報告, 2014.
- [20] Y. Murase, T. Uchitane, and N. Ito, “A tool for parameter-space explorations,” Physics Procedia, vol.57, pp.73–76, 2014.
- [21] S. Ramchurn, P. Vytelingum, A. Rogers, and N. Jennings, “Agent-based control for decentralised demand side management in the smart grid,” Proc. 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2011), pp.5–12, 2011.

付 録

1. EV の消費電力の概算方法

本論文のシミュレーションでは, “負のバッテリー残量” のような現実には起こりえない状況が発生した場合, 計算を停止し, シミュレーション自体を失敗と判定する. したがって, シミュレーション失敗を回避するのに十分な余裕を与える概算を行う必要がある.

本論文のシミュレーションでは, 計算の簡単のため, 全ての EV に関して, 1 秒間の走行あたりの電力消費量 (電費) を 0.75kW と設定する. これは, 平均走行速度 15km/h ^(注7) で走行し, 容量 20kWh のバッテリーを備えた EV が 200km を走行できる状況を想定したためである. 一方, 消費電力の概算は, 1m 進むために 0.3Ws (ワット秒) 必要として計算を行う事とした. この設定の下, 例えば「シミュレータ上で, 1 時間で 15km 進むことができた」ケースを考えると, 以下のようになる.

- シミュレータ上での実際の消費電力
 $0.75\text{kW} \times 3600\text{sec} = 2700\text{kWs}(= 0.75\text{kWh})$

- 消費電力量の概算値
 $15\text{km} \times 0.3 = 4500\text{kWs}(= 1.25\text{kWh})$
 概算では実質的に 9km/h での走行を想定することになる. つまり, 本論文では, 仮定している EV の性能の

6 割程度の性能を前提として消費電力を概算し, シミュレーションを実行する. この設定は, シミュレーションの成功を優先したもので, シミュレーションの失敗という致命的状況の回避には十分であったが, 概算をどこまで厳しくするかは仮想したシステムのパフォーマンスに影響する重要な条件であり, 検討を要する.

2. 提案手法におけるパラメータ

表 A.1 時間帯ごとの発電効率と消費電力の設定値
 Table A.1 Parameters: Efficiency of Power Generation and Power Consumption.

時間帯	発電効率 (%)	消費電力 (kW)
0:00 – 1:00	0.0	0.60
1:00 – 2:00	0.0	0.52
2:00 – 3:00	0.0	0.44
3:00 – 4:00	0.0	0.42
4:00 – 5:00	0.0	0.40
5:00 – 6:00	0.0	0.42
6:00 – 7:00	0.06	0.58
7:00 – 8:00	0.03	0.96
8:00 – 9:00	0.47	1.00
9:00 – 10:00	0.64	0.88
10:00 – 11:00	0.73	0.84
11:00 – 12:00	0.77	0.76
12:00 – 13:00	0.75	0.84
13:00 – 14:00	0.70	0.80
14:00 – 15:00	0.56	0.72
15:00 – 16:00	0.41	0.78
16:00 – 17:00	0.23	0.84
17:00 – 18:00	0.06	1.10
18:00 – 19:00	0.0	1.20
19:00 – 20:00	0.0	1.40
20:00 – 21:00	0.0	1.32
21:00 – 22:00	0.0	1.36
22:00 – 23:00	0.0	1.18
23:00 – 24:00	0.0	0.94

表 A.2 DGA のパラメータ設定
 Table A.2 Parameters for DGA.

Parameters	Values
Chromosome length	14 bits (= L)
Population size	32
Number of islands	4
Max. number of generation	100
Selection method	Tournament selection
Tournament size	4
Crossover rate	1.0
Crossover method	One-point crossover
Mutation rate	0.08 (= $1/L$)
Mutation method	Bit string mutation
Migration interval	5
Migration rate	0.5
Migration topology	Bi-Directional ring
Emigrant method	Tournament selection
Immigrant method	Random

(注7): 国土交通省道路局・三大都市の旅行速度の推移
<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/data/107.pdf> より, 一般道路での平均走行速度は 15km/h 20km/h と見られるため

(平成 28 年 4 月 21 日受付, 9 月 14 日再受付,
 11 月 2 日早期公開)



服部 宏充 (正員)

2004 年名古屋工業大学大学院博士課程修了。2004 年学振特別研究員 (PD)。リバプール大学、マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て、2007 年京都大学大学院情報学研究科助教。2014 年より立命館大学情報理工学部准教授。工学博士。マルチエージェントシミュレーション、社会システムデザイン、人工知能技術の社会導入における ELSI に興味をもつ。



十見 俊輔

2015 年京都大学大学院情報学研究科修士課程修了。同年楽天株式会社入社。マルチエージェントシミュレーションに興味をもつ。



中島 悠

2006 年京都大学大学院情報学研究科修士課程修了。日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2009 年同大学院情報学研究科博士課程修了。博士 (情報学)。京都大学特定研究員及び特定助教を経て、現在、東邦大学理学部情報科学科講師。都市上の人間行動のモデル化及びシミュレーションに興味をもつ。