

網羅的社会シミュレーションの可能性

野田五十樹
産業技術総合研究所

概要

本稿では、マルチエージェント社会シミュレーション (MASS) のロードマップと技術課題について述べ、本領域の方向性について議論する。物理シミュレーションに比べて、MASS はまだシミュレーション基礎モデルの構築の時期である。この構築にあたっての重要な技術的困難が、「モデルの不確かさ」「認識効果」「モデル境界の不自明さ」「不完全情報」である。この困難克服に向け、ここでは、大規模計算資源による解決策を探る。本稿では、人流・交通・市場への応用を取り上げ、その領域での MASS 応用のロードマップと、各々における技術課題を議論する。

1 はじめに

マルチエージェント社会シミュレーション (Multi-agent social simulation, MASS) は社会科学や社会システム設計の実用的ツールとして注目されてきている。特に、人の振る舞いやその相互作用、さらにはその振る舞いからなる社会全体の動きを表現するモデルを検証するため、また、そのモデルがある程度正確になった時には、そのモデルで新しい社会システムの有効性をカクンいするツールとして、MASS は活躍することになる。

近年の MASS の進展は、ビッグデータと高性能計算技術 (HPC) により可能となってきた。インターネットや携帯デバイスにより集められるビッグデータは、社会の様々な状況を反映した情報である。例えば NTT DoCoMo のモバイル空間統計は、今までなかなか捉えることの難しかった都市規模の人口動態を精度よく表している。HPC は、大規模な高速並列計算を可能とし、社会現象の複雑なモデルをリアルなサイズで計算することを可能にしてきた。例えば、[1] は、個人の動きをベースとした都市レベルの避難シミュレーションを HPC で実現している。

しかし、MASS は発展途上の技術である。現状では、人の振る舞いについての信頼に足る汎用モデルはまだできていない。このため、各々の MASS では、そのシミュレーション対象に応じた暫定的なモデルを用いているに過ぎない。このため、MASS の結果の分析・解釈は慎重に行われなければならない。また、MASS の結果を現実の問題解決に適用する場合、同様に慎重に

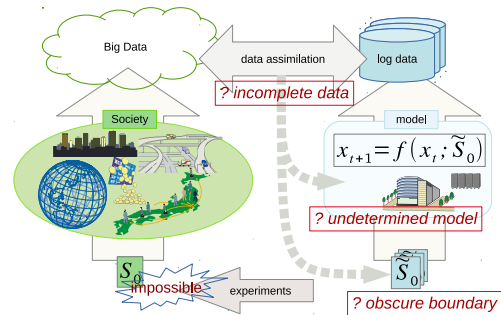


図 1: 社会シミュレーションの図式

進めていく必要がある。特に、人の振る舞いを取り入れている以上、MASS は、その結果を知った人間が、その振る舞いを変更してしまう、そのことを組み込んだ上での活用を考えていく必要がある。

このような MASS の課題を克服するため、いくつかの新しい方法論が提案されてきている。本稿ではそのうちの 1 つ、網羅的シミュレーションの手法について、その可能性を議論していく。

2 社会シミュレーションの特徴

2.1 社会シミュレーションの課題

社会シミュレーション研究における最大の技術課題は、実世界における実験が非常に困難であることである。社会シミュレーション研究におけるシミュレーションと現実の関係は、物理シミュレーションのそれと基本的には同じである (図 1)。つまり、実世界のデータ

や実験データからシミュレーションモデル $f(x)$ を構成し、それをもとに、未知のあるいは将来の社会の状況を予測するのが、社会シミュレーションである。しかし、物理学などと異なり、容易に任意の条件で実世界での実験を行うことができないのが、社会シミュレーションの研究を難しくしている。

この技術課題を詳細化すると、以下ようになる。

- モデルの不確かさ: 物理現象と異なり、容易に実験室実験ができない社会現象では、人の振る舞いのモデルの詳細化が難しく、不確かなモデルのままシミュレーションを進めざるを得ない。特に、人の知的振る舞いは、メタレベルの推論など多様な思考形態を考える必要があり、モデル化が非常に困難である。
- 認識による不確定性: 物理的対象と人の一番の違いは、認識による影響である。物理現象の場合は、同じ実験を繰り返すことは可能であるが、人が系に含まれる社会現象の場合は、人がそれまで行われた実験の結果を知っている場合、外的な条件を揃えたとしても振る舞いを変えてしまうことが考えられる。例えば交通現象の場合、事前に渋滞予測情報を与えてしまうと、その情報を元に行動を変えてしまい、予測情報とは異なる現象を生じさせてしまうかもしれない。よって、MASS では、それを織り込んだ形でのシミュレーションや分析が必要となる。
- 境界の不確かさ: 社会現象では通常、それを切り出すための自明な境界や分節がないことが多い。社会現象は各々複雑にからみ合っており、また、空間的に綺麗に切り出せないこともある。このため、単純なモデルから徐々に構築していく、ということが困難であることも多い。
- 不完全データ: 社会現象をまんべんなく表している、完全で整理されたデータを得ることは困難である。いくらビッグデータが利用可能となっても、人の主観的判断などが重要となる社会現象では、利用できる実データは不完全にならざるを得ない。また、アンケートなどで主観的なデータが得られたとしても、その質や制度についてはばらつきが大きく、扱いづらい場合が多い。

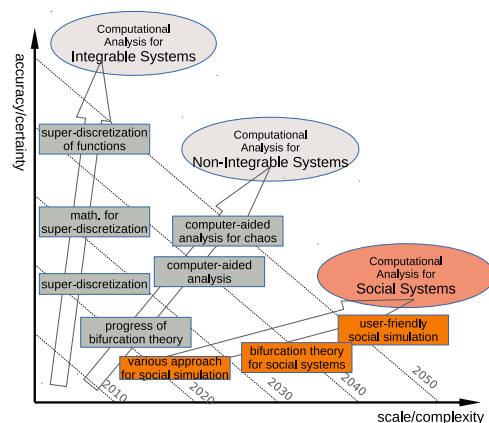


図 2: 複雑系・社会系シミュレーション研究のロードマップ ([12] より作図)

2.2 網羅的シミュレーションの必要性

2.1 節で述べた社会シミュレーションの課題を克服・軽減化する 1 つの方法論が、網羅的シミュレーションである。前節で述べているように、社会のモデルや真の状況について十分正確に得ることは困難である。よって、モデルや状況のある程度不完全であるとあきらめ、その代わりに、その不完全さを、シミュレーション設定を多様にして分析することで、社会システムの振る舞いそのものの分岐理論を構築することを目指す、というのが網羅的シミュレーションの方法論である。

[12] においても、MASS 研究の当面の課題として、社会システムの分岐理論の確立が取り上げられている(図 2)。もし分岐理論を得ることができれば、社会現象の正確な予測が MASS でできなくとも、分岐理論から、安定性や破滅的状況の回避など、社会システム設計に有用な情報を得ることができる。網羅的シミュレーションは、そのような分岐理論確立のための、重要なツールとなり得る。

3 計算量からみた社会シミュレーションのロードマップ

本章では、計算社会科学のロードマップを、計算量の点で整理してみる。特に以下では、人流・交通・市場シミュレーションの 3 つについて、必要な計算量と必要な HPC の規模について、考察していく。

計算量を見積もる上で、我々は、1シミュレーションの大きさと、試行すべきシミュレーションの回数の2つの軸に着目する。2.1節で議論したように、網羅的にシミュレーション試行することが、MASSでは求められる。その網羅性は、どれだけ多数のパラメータで、どれだけ幅広い値を試すか、ということで決定され、具体的にはシミュレーションの設定条件の組み合わせ数となる。これを、試行数 (number of situations) として整理する。もう一方の1シミュレーションの大きさは、一般のシミュレーション規模に対応する。すなわち、取り扱うエージェント数や相互作用の種類が増えれば、シミュレーション規模が大きくなる。また、MASSの場合、人の思考を模倣しているエージェントの意思決定アルゴリズムの重さも重要となる。例えば、各々のエージェントが高度な判断を下すAIで構成すれば、非常に思いシミュレーションとなる。本稿では、これを、一シミュレーションの複雑さ (complexity of one simulation session) として表す。

3.1 人流シミュレーション

避難シミュレーションなどの人流シミュレーションでは、与えられた避難計画や誘導方法のロバストさや有効性を検証することを主眼とする使い方が最も重要となる。一般では避難シミュレーションは最適避難を探るのに用いられると思われがちであるが、このような方法はあまり実効的ではない。というのは、災害の本質として、その時の被害の詳細を瞬時に知ることが一般には困難だからである。シミュレーションでは初期条件を厳密に設定する必要があり、災害直後にその条件をみたまはできない。よって、避難シミュレーションの有効な使い方は、事前に様々な条件でシミュレーションを行い、できるだけ幅広い条件で有効に働く避難誘導方策を見つける、ということになる。このためには、考えられる災害の条件をできるだけつづさにテストできる必要がある。すなわち、数多くの条件に対し網羅的なシミュレーションすることが重要となる。

この方向に向けた研究としては、筆者らの一連の研究がある。[10][11][5][9]。この研究では、南海トラフ地震における津波被害が予想される鎌倉市の材木座地区を対象に、避難する人数によって、効果的な避難方法がどの時点で変化するのかを明らかにする分析を行っ

た。具体的には、町丁目に従ってこの地区を7つに分け、各々から3つの避難所のいずれかに逃げる、というシナリオを全組み合わせ、2,187通り作成する。また、逃げる人数として、70人から10,000人の8通りとした。これらについてシミュレーションを行い分析することで、3000人を境目に、同じ逃げ方の効果が大きく変化することがわかる。このような結果は、最適な逃げ方を教えるものではないが、逃げる人数により複数の案を策定しなければならないことを示唆している。

上記のケースを基準に、様々な避難・人流シミュレーションの計算量を概算してみよう。このケース(図3の図での“city zone, TSUNAMI”)では、約10,000人が数キロ四方の市中心部周辺での避難を取り扱っている。この計算に、32コアのワークステーションを用いて約1ヶ月かかっている。これに対し、地域を金沢市海浜地区に移したケース[16](図3の“city zone, TSUNAMI and HEAVY SNOW”)では、人口及び地域の広がりには大きな差はなく一シミュレーションの複雑さに差はない。一方、想定する場合の数として $4,194,304$ (2^{22})を考慮しており、試行数は約2000倍となる。よって、図3の図では、“number of situations”の方向にずれることとなる。実際、この計算を行うために、300コアのクラスタマシンで約1ヶ月要している。

さらに大きなケースとしては、北千住エリアからの避難[13]では、人口が70000人と大きくなり、一シミュレーションの複雑さは大きくなる。また、場合の数も、44の施策を検討することが考えられ、その場合を網羅するとすると 2^{44} 通りの場合の数を扱うことになる。このケースについては、図3の図では“dense-population zone, complex disaster”で示される。

さらに対象を東京エリアなど大都市全体とすると、一シミュレーションの複雑さ・考慮すべき場合の数も増え、図3の“megacity”に示すような計算量に増えていくことになる。これらのケースでは、ポスト京で想定される計算力が必要とされることになる。

3.2 交通シミュレーション

交通および流通は社会シミュレーションの中でも幅広い応用を要した分野である。このため、交通シミュレーションの研究は長い歴史があるが、特に近年はドライバーの細かい状況判断や情報提供の効果を反映で

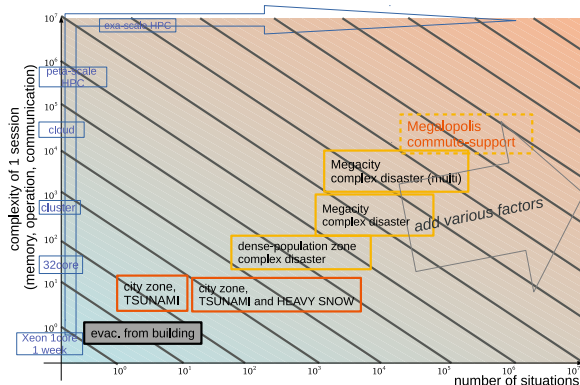


図 3: 人流・避難シミュレーションのロードマップ

きるマルチエージェントシミュレーションが注目されてきている。

Osogami ら [6] は、IBM Mega Traffic Simulator という交通シミュレータを開発している。彼らはマルチエージェント用分散実行ミドルウェアの XASDI をベースに、大規模な交通シミュレーションをマルチエージェントで高速実行することに成功している。このようなマルチエージェントシミュレーションにより、ドライバーごとの性格の違いを反映した分析を可能としている。

人流シミュレーション場合と同じく、交通シミュレーションのロードマップでも、基準点として比較的小規模な参照点から今後の応用における計算量を推定していく。参照点としては、[7] で取り組まれた広島エリアでの研究を用いる。このケースでは、一シミュレーションの規模としては 70,000 エージェント、道路網のサイズとしては 120,000 リンク、時間にして 15 時間を対象としている。また、場合の数は 20 通りであった。この計算に、1 コアのワークステーションを用いて 1 日を要している。このケースを、図 4 で “million city, road plan” と示す。

これを基準にいくつかのケースを考えていく。例えば東京区内エリア全体を扱うことを想定すると、エージェント数（車両数）は約 200 万となり、道路網も 61 万リンクとなる。さらに東京圏を対象を拡大すると、エージェント数は 400 万、道路網は 250 万となる。考慮すべきケース数をシミュレーションスケールに比例させるとすれば、その計算量は図 4 の “Tokyo, traffic control” および “metropolis, traffic control” あたりとなる。

さらに、オリンピックなどの大規模イベントや長期

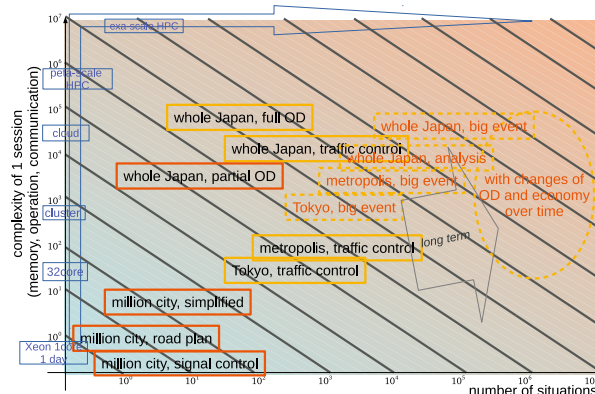


図 4: 交通シミュレーションのロードマップ

の交通の変化まで考慮に入れるとすると、“Tokyo, big event”、“metropolis, big event”、“whole Japan, big event” と段階的に必要な計算資源が増えていく。この規模となると、Exa-scale の計算力が必要となることになる。

3.3 市場シミュレーション

市場シミュレーションは、近年注目を集めつつある社会シミュレーション分野である。市場を含む経済の状態は従来はマクロ的な指標でしか捉え難かったが、MASS の大規模化に伴い、ミクロレベルでの分析ができるようになってきたことが大きな変化である。また、実際の市場でも IT 化に伴って高速取引などが導入され、これらが価格決定に及ぼす影響も大きくなってきている。このような現象の解明はミクロでの取引から解析するしかなく [2]、エージェントシミュレーションが重視されてきている背景となっている。また、人流や交通と異なり、エージェント同士の相互作用がかなり高頻度で行われ、その売り買いの判断にも高度な思考が想定できる点も、MASS の中で市場シミュレーションがユニークな存在である要素になっている。また、このことにより、計算量の面でも大きなコストがかかることになる。

このような市場シミュレーションの計算量の参照点として、株式取引におけるティックサイズの大きさと市場間競争の関係を調べた研究 [15] をとりあげる。この研究では、同じ株を扱う異なる市場を考え、それらの市場で用いるティックサイズ（株価の値動きの最小単位）がどのように各市場のシェアに影響を与えるか

を調べている。各株式市場は現在、国際的な競争関係にあり、良いサービスで利用者の引きつけを狙っている。ティックサイズの微細化はそのようなサービスの一つであるが、導入には設備投資も必要であるため、慎重な導入が求められる。[15] の研究は、どのような条件においてティックサイズの微細化を行うと効果的かを探るため、事前のシェアと相互のティックサイズの違いについて様々な設定で網羅的シミュレーションを行い、ティックサイズの微細化が有効あるいは必要な条件を見出している。

この研究の計算量は以下のようにになっている。まず一シミュレーションの大きさとしては、1種類の株をあつかう2つの市場に1000対の取引エージェントが参加し、1,000万回の取引を行っている。また、考慮するケースとしては、5種類のティックサイズを用いて、各々100回のシミュレーションを行い、市場のシェアの変遷を調べている。このシミュレーションに、1コアのワークステーションで約1日を要している。これをロードマップの基準点として、図5に“tic size”と記している。

この基準点を元に、様々な市場シミュレーションのケースをプロットしていくと、以下のようになる。まず[3]の研究では、市場の過度の変動を防ぐ制度として用いられる“daily limit”の評価を行っている。この研究では、10~20の株を扱っており、一シミュレーションサイズも場合の数も“tic size”の10倍のシミュレーションを扱っている。[2]では、同じ株の僅かな値段の差を高速取引でサヤ取りする“arbitrage”が市場に与える影響を調べるシミュレーション評価を進めている。この場合には、“daily limit”に比べて、一シミュレーションおよび場合の数が10倍のシミュレーション評価を必要としている。さらに大きなモデルとしては、金融機関等大きな取引エージェントが受ける国際規制であるバーゼル規制について、それが市場形成に悪影響を与えないかの評価を行うには、三品目など小規模なケースにおいても、“arbitrage”に比べて、シミュレーション規模で10倍、場合の数で100倍程度のシミュレーションが必要とされると予想されている(“Basel Capital Accords (3names)”)。さらには、株式市場に起因する銀行間の連鎖倒産などを扱っていくためには、一シミュレーション規模を100~1000倍、場合の数も10倍増やしていく必要があると予想されている。この規模になると、exa-scaleのHPCでも扱

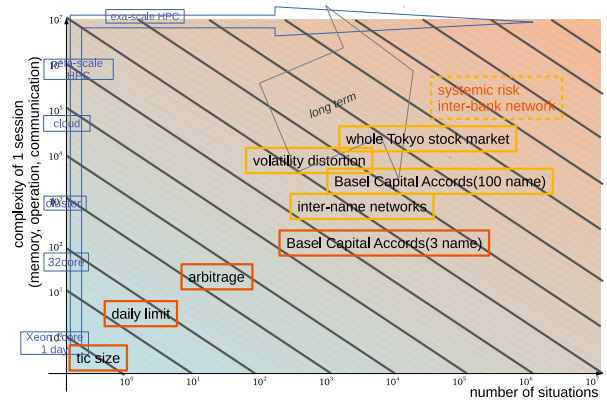


図 5: 市場シミュレーションのロードマップ

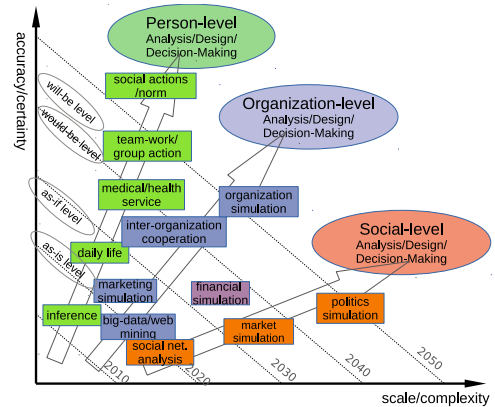


図 6: 個人・組織・社会レイヤー各々における MASS 研究の段階 ([12] より作図)

うのが困難となってくるため、シミュレーション自身や、シミュレーションのケースの選び方に工夫が必要となってくる。

4 MASS の研究課題と方法論

4.1 MASS の応用分野

これまで述べてきたように、MASS の応用分野は広い。例えば、経済一般の現象や物流・交通、福祉や防疫、さらには行政や政策決定などさまざまなレベルや階層に分けることができる。[12] では、これらの分野を、個人・組織・社会という3つの方向性で整理し、現状再現から未来予測・未来設計の段階で整理している(図6)。この段階の部分では、現状をシミュレーションで再現して分析可能とする as-is level、それをもと

に、条件を変更した場合の状況を推定する as-if level、将来予測を行う would-be level、さらには将来設計となる will-be level の段階をおいている。もちろん後段になるほど難しいが、シミュレーションの応用としては、より幅広い活用が期待できる。各々方向性・段階に応じて、図に示すような応用を上げているが、これ以外にも多くの活用方法を考えることができる。

4.2 シミュレーションの目的

他のシミュレーション技術と同じく、MASS も様々な使い方がありえる。

シミュレーションの一番メジャーな利用法は最適化であろう。つまり、ある評価関数を最大化する社会の条件を探るために、MASS を試行錯誤的に使う。これは、前節で述べた利用段階のうち、will-be level に対応する。例えば交通シミュレーションにおいて、交通渋滞を軽減化するのに最適な道路網の設計を行う、といった使い方である。

一方で、避難シミュレーションのところで議論したように、トレードオフの構造を探るためにも MASS は活用できる。多くの社会問題は、単純な最適化ではなく、複数の評価関数を最大化する、多目的最適化問題である。このような設定でトレードオフを探る問題は、利用段階では would-be level に対応すると考えられる。例えば、避難に関する防災計画で、避難の効率に対する効果と、それを実際に社会に実装するためのコストの最小化は、なかなか両立しない問題である。この関係を MASS で明らかにすることができれば、政策決定などへの活用が広まると言える。

MASS は、社会問題の主要因を探ることに使えることができる。つまり、as-if level の利用段階で述べたように、条件を変えながら、社会の振る舞いがどう変わるかを分析することで、どの条件が聞いているかを探るのは、シミュレーションとしても一般的な利用方法であろう。別の視点で言えば、課題発見のツールとして、MASS を使うことができる。例えば、[4] では、従来の公共交通と新しい公共交通について、その効果の違いが営業規模の違いに依存していることを示している。これにより、新しい公共交通を導入するのに、どういう条件をクリアすべきかを示しており、MASS の利用方法の 1 つを示している。

5 さいごに

本稿では、計算量の観点から見た MASS のロードマップと、応用の形態からみた MASS の応用ロードマップの整理を試みた。

計算量のロードマップにおいては、計算量について素朴な積み上げのみを行ったが、これには、さらなる工夫が可能である。実際、実験計画法により、試すべき試行回数を減ずる方法 [14] や、進化計算を用いたパラメータの探索手法 [8] など実用的かつ汎用的な方法として活用できるであろう。また、各々のシミュレーションを高速化することも、今後は必要になってくると考えられる。

一方、本稿では十分に議論できなかったが、エージェントの思考の高度化による計算量の増大も、より詳細な検討が必要である。2.1 節でも議論したように、人間を含んだ系を扱う MASS では「認識による不確定性」は避けて通れない。特に、情報を知ったうえでどういう行動を撮るか、ということは、形式的には、各エージェントの頭の中にさらに MASS が入れ子になっている状態といえる。これをまともに取り扱うと計算量は一気に指数的に増えることになり、現実的ではない。この問題を解決するには、思考のモデリングを含めた AI の進展が必要になってくると考えられる。

参考文献

- [1] Leonel Aguilar, Maddeggedara Lalith, Tsuyoshi Ichimura, and Muneo Hori. On the performance and scalability of an hpc enhanced multi agent system based evacuation simulator. *Proceedia Computer Science*, 108(Supplement C):937–947, 2017. International Conference on Computational Science, ICCS 2017, 12-14 June 2017, Zurich, Switzerland.
- [2] S. Kawakubo, K. Izumi, and S Yoshimura. Analysis of an option market dynamics based on a heterogeneous agent model. *Int. J. Intell. Syst. Acc. Fin. Mgmt.*, 21:105–128, 2014.
- [3] Takanobu Mizuta, Kiyoshi Izumi, Isao Yagi, and Shinobu Yoshimura. Design of financial market

- regulations against large price fluctuations using by artificial market simulations. *Journal of Mathematical Finance*, 3(2A):15–22, 2013.
- [4] Itsuki NODA, OHTA Masayuki, Yoichiro KUMADA, and Hideyuki NAKASHIMA. Usability of dial-a-ride systems. In *Proc. of AAMAS-2005*, pages (p-726), Jul. 2005.
- [5] Yudha Nurdin, Diyah K. Yuliana, Itsuki Noda, Shunsuke Soeda, and Tomohisa Yamashita. Disaster evacuation simulation with multi-agent system approach using netmas for contingency planning (meulaboh case study). In *Proc. of 5th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery 2010*, page ??? AIWEST-2010, Nov. 2010.
- [6] Takayuki Osogami, Takashi Imamichi, Hideyuki Mizuta, Tetsuro Morimura, Rudy Raymond, Toyotaro Suzumura, Rikiya Takahashi, and Tsuyoshi Ide. Ibm mega traffic simulator. *IBM Research and Development Journal*, 2013.
- [7] Takayuki Osogami, Hideyuki Mizuta, and Tsuyoshi Ide. Identifying the optimal road closure with simulation. In *Proceedings of the 20th ITS World Congress Tokyo 2013*, 2013.
- [8] Takeshi Uchitane, Chenting Zhou, and Toshiharu Hatanaka. Applying evolutionary design of experiments to sensitivity analysis of tsunami evacuation simulation. In *2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its applications*, pages 538–541, 2016.
- [9] Tomohisa Yamashita, Hiroyasu Matsushima, and Itsuki Noda. Exhaustive analysis with a pedestrian simulation environment for assistant of evacuation planning. In *Prof. of PED 2014*, pages SE05–3, Oct. 2014.
- [10] Tomohisa Yamashita, Shunsuke Soeda, and Itsuki Noda. Evacuation planning assist system with network model-based pedestrian simulator. In Jung-Jin Yang, Makoto Yokoo, Zhi Jin Takayuki Ito, and Paul Scerri, editors, *Principles of Practice in Multi-Agent Systems (Proc. of 12th International Conference, PRIMA 2009)*, pages 649–656, Heidelberg, December 2009. Springer.
- [11] Tomohisa Yamashita, Shunsuke Soeda, and Itsuki Noda. Assistance of evacuation planning with high-speed network model-based pedestrian simulator. In *Proceedings of Fifth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED 2010)*, page 58. PED 2010, March 2010.
- [12] 横断型基幹科学技術研究団体連合, editor. 分野横断型科学技術アカデミック・ロードマップ, chapter 第4章, pages 85–169. 横断型基幹科学技術研究団体連合, 2009.
- [13] 山下倫央, 野田五十樹, 荻野光司, 高田和幸, and 大原美保. 歩行者シミュレーションを用いた二段階避難による混雑軽減の分析. 人工知能学会論文誌, 31(6):AG-I.1–9, 11月 2016.
- [14] 松島裕康, 内種岳詞, 辻順平, 山下倫央, 伊藤伸泰, and 野田五十樹. 実験計画法による実験数削減と有意なパラメータ探索の避難シミュレーション分析への適用. 人工知能学会論文誌, 31(6):AG-E.1–9, 11月 2016.
- [15] 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, and 吉村忍. 人工市場シミュレーションを用いた取引市場間におけるティックサイズと取引量の関係性分析. JPX ワーキングペーパー Vol.2, 日本取引所, 2013.
- [16] 内種岳詞, 山下倫央, 辻順平, 松島裕康, 野田五十樹, and 伊藤伸泰. 避難シミュレーションへの進化計算適用結果の分析. In *SSI2015 予稿集*. 計測自動制御学会, 2015. SSI 研究奨励賞.