

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「ポストペタスケール高性能計算に資する  
システムソフトウェア技術の創出」  
研究課題「超大並列計算機による社会現象シミュレ  
ーションの管理・実行フレームワーク」

## 研究終了報告書

研究期間 平成24年10月～平成30年 3月

研究代表者:野田 五十樹  
(産業技術総合研究所  
人工知能研究センター、総括研究主幹)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

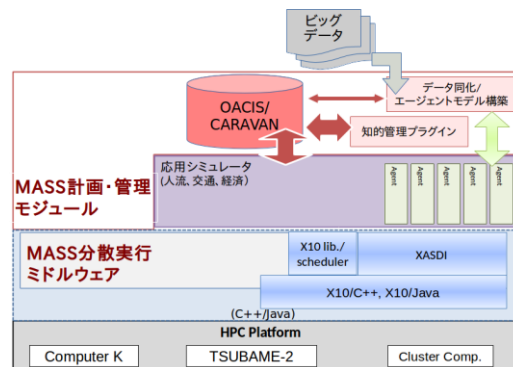
本課題では、社会・経済・政治などの離散事象のシステム(以下、社会システム)を計算科学の対象とするマルチエージェント社会シミュレーション(Multi-Agent Social Simulation、MASS)を、網羅的かつ大規模に実行・制御するための開発・運用フレームワークを構築した。当フレームワークは、主として、「MASS 計画・管理モジュール」および「MASS 分散実行ミドルウェア」からなる(下図)。

MASS 計画・管理モジュールでは、膨大な数にのぼる組み合わせ条件でのシミュレーションを分散環境で実行・管理するものであり、具体的なソフトウェアとして、OACIS と CARAVAN(理研グループ)、およびそれらのプラグインモジュール群(野田グループ)の開発を行った。プラグインモジュールとしては、実験計画法と三分探索を組み合わせた効率的網羅探索機構や、多数の入力パラメータを探索して複数の目的関数を最適化する改良型 NSGA-II モジュールなどを用意した。また、プローブデータなどのビッグデータから入力パラメータやエージェントモデルを構成・改善していく手法についても研究を行った(IBMグループ・服部グループ)。

MASS 分散実行ミドルウェアでは、エージェントシミュレーションで広く用いられる X10 言語の京への移植・チューニング等を行い、HPC Challenge で好成績を収めたほか、実際のアプリケーション開発を通じて、HPC 上でエージェントの並列実行を効率的に行うライブラリ群の開発を行った(鎌田グループ)。さらに、並列分散環境でのエージェントシミュレーション実行基盤となる XASDI を拡張・再実装し、HPC 上において並列性能のスケラビリティ検証などを行った(IBMグループ)。

以上のモジュール・ミドルウェアはオープンソースとして公開するほか、out-of-the-box でフレームワークを容易に利用できる環境として、Cloud Foundry 上のサービスパッケージによるデモ検証や docker 化を行い、GitHub において docker ファイルを公開している。

開発したフレームワークの機能検証を含めた実用評価として、人流・交通・経済の3つの応用分野でのアプリケーションをとりあげ、スケラビリティの確認や機能増強を行うとともに、これらの応用分野について実用的なシミュレーション分析を行い、開発したフレームワークと各社会シミュレーションの有用性を具体的に示した。例えば人流シミュレーションでは、いくつかの地域の避難方法について様々な条件での網羅的なシミュレーションを実施することで、各種避難方法や対策における課題の見える化が行えることを示した(野田グループ)。交通シミュレーションでは、全世界や日本全国規模の交通シミュレーションが HPC 上で可能であることを示したほか、大規模で網羅的なシミュレーションを行うことで、都市における交通制御方法の評価を、様々な視点で評価できることを示した(伊藤グループ・服部グループ・IBMグループ・理研グループ)。さらに、経済シミュレーションでは、株式市場間のシェア競争やフラッシュクラッシュなどの現象をシミュレーションで模擬することを実現し、市場における規制やサービスがどのような影響を与えるかを様々な条件で評価できることを示した(伊藤・和泉グループ)。これらの成果は、東証への情報提供や一般市民の防災リテラシー向上活動への協力など、実社会に向けた還元・社会実装を進めている。



図： 開発したフレームワークとソフトウェア階層

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

### 1. 計算機シミュレーションの実行やその結果を管理するためのソフトウェア「OACIS」および「CARAVAN」とプラグインモジュール群

概要:

OACISは、多種類のパラメータの多数にのぼる組み合わせでのシミュレーションを、分散環境で実行管理・結果収集とその解析機能を提供する。また、CARAVANは、OACISの能力を超える $10^7$ 以上の条件の組み合わせについてMPI並列で網羅実行を実現する枠組みを提供する。プラグインモジュールとしては、実験計画法と三分探索により組み合わせ爆発を抑えながら主要因となっているパラメータ空間の探索を実現する機能や、GAによる多目的最適化をHPCの並列性を損なわずに行う機能などを提供する。これにより、社会現象など厳格なモデル設定が困難な対象でもシミュレーションによる分析を簡易に実施できるインターフェースを提供する。

### 2. X10 処理系の京コンピュータへの移植とエージェント並列化スケジューラ

概要:

超並列分散 MASS で広く用いられている X10 言語の京/FX10 への移植作業を行い、native 版 (ver. 2.4.1)、managed 版(ver.2.5.0.1)を京上で動作確認をおこない公開。native 版については、SC13 にて開催された HPC Challenge Class 2 Awards に、IBM Watson グループと共に参加し、finalist に残った。また、実際のアプリケーション開発を通じて異種エージェントの思考計算の並列実行スケジューラを開発し、高速市場取引等の大規模なエージェントシミュレーションを可能とした。

### 3. エージェントシミュレーション分散実行基盤の開発とパッケージ化

概要:

分散したノード間でのメッセージおよびエージェント自体の移動を簡潔に記述し分散環境で効率よく実行するエージェントシミュレーション分散実行基盤 X10-based Agent Simulation on Distributed Infrastructure (XASDI)を開発した。この XASDI は Java による Bridge API を提供するため、幅広いエージェントシミュレーションの移植を容易にしている。本課題では、この XASDI を使って交通シミュレーションおよび人流シミュレーションを開発し、実際の地図などを持ちいて日本全国規模のシミュレーションや都市における交通政策評価、商業地の人流分析を実現できることを示している。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

### 1. 市場シミュレーションによる市場システムの評価

概要:

市場シミュレーションを用いて多数のパラメータスタディを行い、フラッシュクラッシュなどの市場での各種現象の再現を行った。例えば、株式市場におけるティックサイズとそれによる市場シェアの推移の変化を分析し、実際の東京証券取引所での実データと比較して、株価の変動に対して適正なティックサイズの閾値を求めた。また、自己資本比率規制などが市場に与える影響を調べ、各種制度設計の検証を行った。これらの分析結果が東京証券取引所などに提供され、例えば 2014 年から実施された東京証券取引所のティックサイズ変更において銘柄の絞り込みの方針に反映されるなど活用された。

### 2. 網羅的避難シミュレーションと NIGECHIZU SIMULATOR

概要:

津波からの避難を題材に、400 万通りを超える条件での網羅的シミュレーションを行い、防災対策の有効性分析を行えることを示した。また、300 を超えるパラメータを調整して複数の目的

での最適化をシミュレーションで行う枠組みを実現し、避難の効率と誘導の困難さなどのトレードオフ状況の見える化を実現した。さらに、防災対策の担当者として事前対策を選択するゲーム形式の啓発アプリケーション NIGECHIZU SIMULATOR を開発し、地域防災コミュニティ啓発活動「逃げ地図プロジェクト」とタイアップし、各地美術館などで展示を行ってきた。

### 3. 交通シミュレーションによる公共交通サービスの設計支援

概要:

公共交通サービスの設計を支援するため、網羅的シミュレーションの枠組みを交通シミュレーションに適用し、タクシーの実車データからのデータ同化や、利便性とコスト、価格設定のトレードオフの解析を行った。これらの結果は別プロジェクトにおいて実施していた乗り合いタクシーのサービスである Smart Access Vehicle System に反映され、実証実験の設計支援を行うことができた。また、この実証実験の成果をもとに設立されたベンチャー会社では引き続き網羅的シミュレーションの仕組みを活用してきている。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ①野田グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
野田 五十樹	産業技術総合研究所 人工知能研究センター	総括研究主幹	H24.10～H30.3
山下 倫央	同上	主任研究員 外来研究員	H24.10～H29.3 H29.4～H30.3
松島 裕康	同上	特別研究員	H24.12～H30.3
落合 純一	同上	特別研究員	H26.4～H26.5 H28.10～H29.7
渡辺 隼史	産業技術総合研究所サービス工学研究センター	特別研究員	H25.6～H27.3
辻 順平	産業技術総合研究所 人間情報研究部門	特別研究員	H26.5～H28.3

研究項目

- ・大規模社会シミュレーション実行計画機構の開発
- ・全体調整とパッケージ統合

#### ②伊藤・和泉グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
伊藤 伸泰	東京大学	准教授	H24.10～H30.3
和泉 潔	同上	教授	H24.10～H30.3
島田 尚	同上	助教	H24.10～H30.3
藤井 秀樹	同上	講師	H25.4～H30.3
米納 弘渡	同上	特任研究員	H28.4～H30.3
吉岡 直樹	同上	特任研究員	H26.6～H28.9
青木 尚登	同上	D2	H24.10～H27.3

大石 晃史	同上	D2	H24.10～H29.3
平岡 喬之	同上	D1	H26.4～H26.9
水田 孝信	同上	D2	H24.10～H27.9
川久保 佐記	同上	D1	H26.4～H28.9
鳥居 拓馬	同上	特任研究員	H26.4～H28.9
山田 健太	同上	助教	H26.4～H28.9

研究項目

- ・大規模社会シミュレーション結果管理マネージャの開発
- ・大規模社会シミュレーションのエージェントシミュレーション技術の開発

③服部グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
服部 宏充	京都大学 立命館大学情報理工学 部	助教 准教授	H24.10～H26.3 H26.4～H30.3
小川 祐樹	同上	助教	H27.4～H30.3
中島 悠	東邦大学理学部	講師	H26.4～H29.3

研究項目

- ・エージェントモデル選択機能の実現

④IBM グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
水田 秀行	日本アイ・ビー・エム株 式会社・東京基礎研究所	Research Staff Member	H24.10～H30.3
今道 貴司	同上	Research Staff Member	H29.4～H30.3
渡辺 日出雄	同上	数理科学担当部 長	H25.2～H30.3
吉濱 佐知子	同上	デジタルディス カバリー担当部 長	H26.4～H29.3
鈴木 豊太郎	同上	主任研究員	H24.10～H25.9
恐神 貴行	同上	リサーチスタッ フメンバー	H24.10～H25.3
森村 哲郎	同上	主任研究員	H25.4～H27.3
Rudy Raymond Harry	同上	主任研究員	H25.4～H25.9
前田 久美子	同上	研究員	H25.10～H28.2
勝木 孝行	同上	研究員	H25.10～H27.3
井手 剛	IBM リサーチ T. J. Watson Research Center	Supplemental Research Staff Manager	H24.10～H26.3
村田 浩樹	日本アイ・ビー・エム株	リサーチスタッ	H26.4～H28.3

	株式会社・東京基礎研究所	フメンバー	
Kugamoorthy Gajananan	同上	ポスドク研究員	H26.7～H27.3

研究項目

- ・エージェントシミュレーション分散実行基盤とパラメータ分析・推定機構の開発

⑤鎌田グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
鎌田 十三郎	神戸大学大学院システム情報学研究科	講師	H24.10～H30.3
藤島 大輔	同上	M2	H27.10～H30.3
松浦 出	神戸大学経済学部	B4	H28.4～H30.3
長門 広洋	神戸大学工学部情報知能工学科	M1	H28.10～H30.3
仙波 雅也	神戸大学大学院システム情報学研究科	M2	H24.12-H25.3
熊谷 良夫	同上	M2	H24.12～H24.12
中原 勇輝	同上	M2	H25.12～H27.3
畑谷 卓哉	同上	M2	H26.7～H28.3
山下 憲人	同上	M2	H27.5～H29.3

研究項目

- ・分散エージェントシミュレータのための言語処理系の移植および高速化

⑥理研グループ

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
伊藤 伸泰	理化学研究所	チームリーダー	H25.4～H30.3
稲岡 創	同上	研究員	H25.4～H30.3
村瀬 洋介	同上	研究員	H25.4～H30.3
吉岡 直樹	同上	研究員	H28.10～H30.3
Shih-Chieh Wang	同上	特別研究員	H27.8～H30.3
今井 哲郎	同上	特別研究員	H25.4～H27.3
内種 岳詞	同上	特別研究員	H25.4～H28.3
浅野 優太	同上	特別研究員	H26.4～H27.3

研究項目

- ・大規模社会シミュレーション実行計画機構の開発
- ・大規模社会シミュレーションのエージェントシミュレーション技術の開発
- ・ペタスケール計算機によるポストペタ実証研究

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- 経済物理の分野の研究者とともに、社会シミュレーションの国際会議、ICSMS-EC-14 を開

催。

- 内外の計算社会科学の研究者とともに、2018 年発刊となる Journal of Computational Social Science を立ち上げ。

## § 3 研究実施内容及び成果

### 3.1 MASS 計画・管理モジュール

#### ① 研究のねらい

社会現象を含む複雑系シミュレーションのロードマップに示される、社会システム設計のためのシステム分岐理論の確立に資するため、HPC 等の計算機資源を有効に活用しつつ対象となる社会システムのモデルを網羅的に調べる枠組みを提供する。

#### ② 実施方法

「MASS 計画・管理モジュール」では、与えられた MASS について、膨大な数に上る可能な設定から、目的に応じて実験計画を立て、また、分析や次の実験計画立案のために実行結果を管理する機構を実現する。これに向けて、以下の項目を開発していく。

##### (1) シミュレーション結果管理マネージャ(担当:理研グループ)

MASS において重要となる多様なケースの網羅的なシミュレーション実行の実験設定およびその結果を管理するデータベース機能を実現する。

##### (2) シミュレーション実行計画機構(担当:野田グループ)

シミュレーションが対象とする社会システムの挙動の構造分析やシステム同定を効果的に行うため、結果管理マネージャに格納された実行状況記録を参照しつつ、能動学習や実験計画法等の手法を用いてシミュレーションしていくべき設定の計画を逐次立案し、プラットフォームに応じて効果的な分析を行うための実行制御を実現する。

##### (3) パラメータ分析・推定機構(担当:IBM グループ・服部グループ)

シミュレーションしている現象についての実データが利用可能である場合に、その実データに則したシミュレーション設定を集中して行うデータ同化機能を実現する。

#### ③ 実施内容と成果

##### (1) シミュレーション結果管理マネージャ

シミュレーション設定の網羅的組み合わせの順序を、HPC 基盤上での超並列実行を前提としてシミュレーション結果の分析に基づき動的に増強・変更していける枠組みを検討し、最終的に、分散データベースを基盤とする管理マネージャ、OACIS を設計・実装した。OACIS の基本構造は図 1 に示すように、データベースを中心に web アプリケーションの形をとり、バックエンドの HPC を呼び出す形式となっている。データベースは分散化を前提として mongoDB を用いており、数千程度のシミュレーションを実行管理し、数十万程度の実行結果の管理を可能とすることを想定している。ユーザはブラウザ画面から、バックエンドや使用するシミュレータ、設定条件などを操作する形式をとる。これは、将来、計算機技術者以外の社会学者などが容易に操作できるようにすることを想定している。また、実行したシミュレーションをパラメータ空間中に図示したり、多数の実行済みシミュレーションの結果をまとめて図示する機能なども備え(図 2)、またユーザ自身がシミュレーション結果をパラメータ横断的に処理する解析アプリケーションを登録して OACIS 上で解析する機能も有する。社会シミュレーションなどでは、シミュレーション結果について一部の条件での結果を参照しながら条件の詳細化を進める必要があることから、網羅実行のインタラクティブ性が重要となる。実行結果のリアルタイム参照機能はこれにこたえるための機能となっている。

OACIS の性能評価については、各グループが持っているアプリケーションを用いて性能検証および機能の充実を図った。この性能検証では、400 万通りの避難シミュレーション設定の組み合わ

せについて複数のクラスタにまたがり並列シミュレーションを行い、避難時間に影響を及ぼす要因を複合要因を含めて解析・抽出することに成功している。

このOACISは、2014年4月にversion 1を公開し、講習会などのプロモーションを行い、本課題に限らず幅広い利用者を獲得している。また、このユーザよりのフィードバックにより改定を続け、2017年にversion 2を公開した。

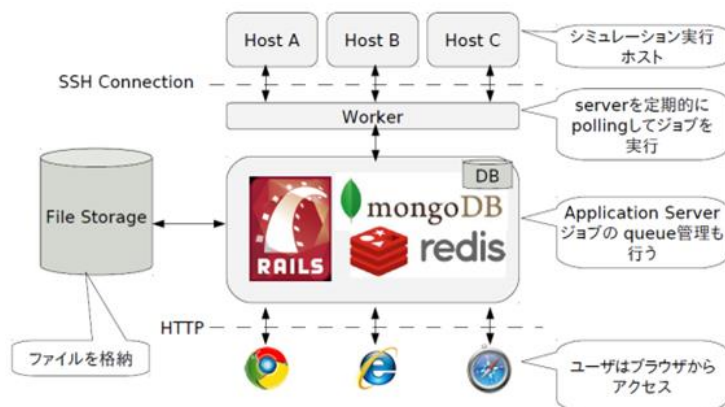


図 1 OACIS の構成図

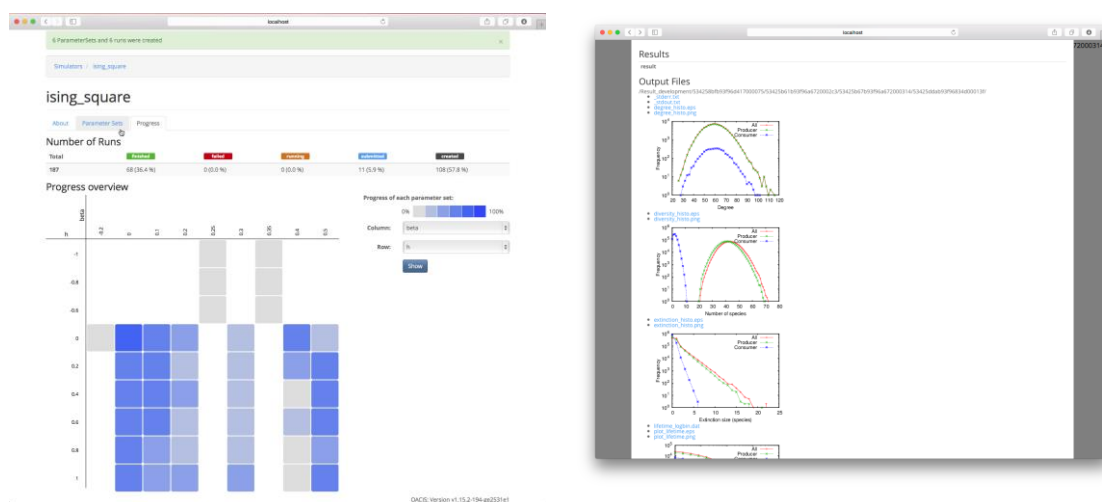


図 2 OACIS Ver.2 の画面

さらに、OACISは $10^7$ 実行数程度までを想定したものであるが、ポストペタ以降でのさらなる活用を目指し、この実行数をはるかに超える規模の実行管理を実現するCARAVANの開発に着手した。CARAVAN(図 8)はPGAS言語X10を使って相当数の実行管理を1つの並列jobとして大並列計算機に投入する仕組みにより、システムに負担をかけることなくOACISの限界を超える管理の実現を目指し、 $\beta$ 版の試用を続け、性能・機能テストを行っている。CARAVANについては、本年度中に公開する予定である。



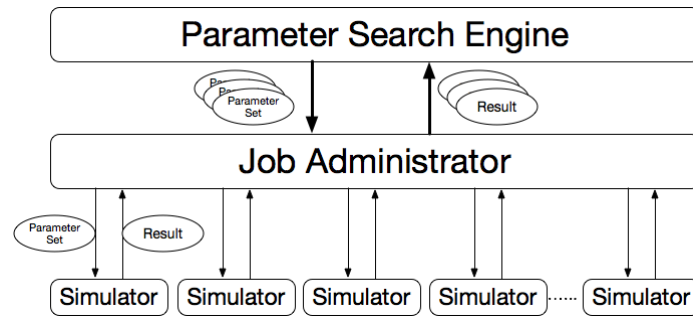


図 3 CARAVAN の構成

(2) シミュレーション実行計画機構

優先順位付きで探索的にシミュレーションを実行する機構としては、まず、実験計画法に三分探索と強化学習の手法を組み合わせた仕組みを構築した。実験計画法ではパラメータの組み合わせの直交性により、各パラメータの実験結果への影響を少ない組み合わせで統計的に調べることができるが、その直交性を維持しつつパラメータの細分化を行う方法としてパラメータ区間を三分割する三分探索の方法を構成した(図 6)。これはパラメータ最適化でよく用いられる二分探索の拡張で、単純な二分探索では崩れる直交性を三分割で維持し、シミュレーション結果を有効に活用する方法となっている。またパラメータ空間でのシミュレーション結果の分類を行うためには、特徴点付近を詳細に調べつつ、同時にまんべんなく調べる必要がある。これを実現するために、強化学習などで用いられる  $\epsilon$ -greedy をもちいた探索的パラメータ組み合わせ法を構成した。この機構は上記の OACIS のモジュールとしてプラグインして用いることができるようになっている。

この OACIS モジュールの性能を評価するため、これまで取り組んできた鎌倉市における非難シミュレーションにおいて、避難方策における避難人数が与える影響の、避難人数間の相関を求めることを題材に、どれだけ組み合わせ数を削減できるかを試みた。この事例では、避難方策の組み合わせは全部で 2,187 通りあり、避難人数を 70 人から 10,000 人まで 11 通りとする。これに、各条件におけるサンプル数を 3 回とすると、従来の網羅的シミュレーション手法では合計 72,171 回のシミュレーションを行うことになる。それに対し、提案手法では 486 回のシミュレーションで解析を終了することができた。その解析結果を図 1 に示す。この図からわかるように、提案手法においても、網羅的探索手法とほぼ同じ相関が得られており、かつ、避難人数が 2,000 人と 3,000 人の間に相関の谷があり、この人数で避難の現象に相転移が起きていることが、(a)、(b) 双方同様に読み取れる。このことから、提案手法により単純な網羅的手法によるシミュレーション回数を大幅に削減できることが示された。

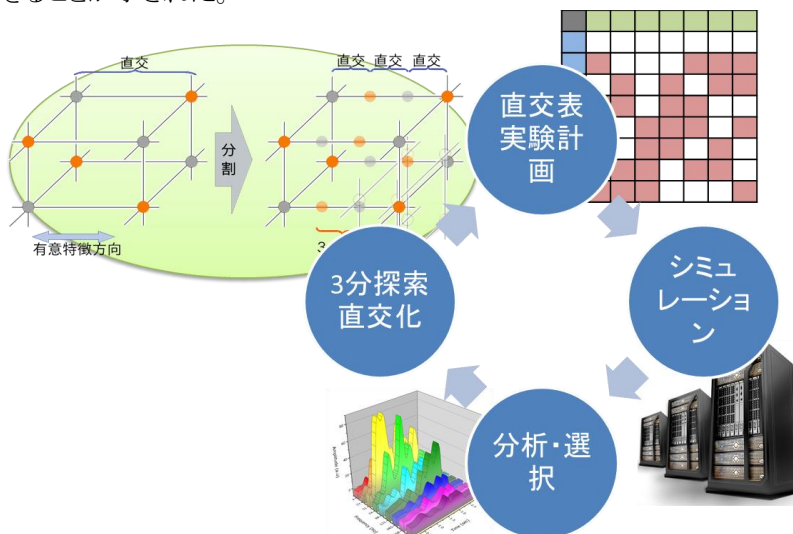
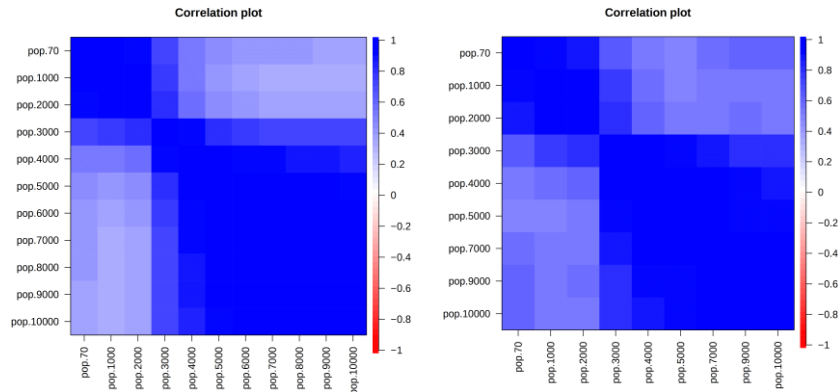


図 4 三分探索直交化 OACIS モジュール



(a) 網羅的探索による相関係数 (b) 提案手法による相関係数

図 5 全網羅および提案手法で得られた相関係数行列のヒートマップ表示

また、社会シミュレーションにおいてよく取り上げられる多目的最適化による方策パラメータ探索を遺伝的アルゴリズムにより大規模かつ効率的に行うためのモジュール(改良型 NSGA-II モジュール)を開発した。多くの社会的現象は複数の最適化評価軸をもち、単純な最適化問題ではなくトレードオフ構造になっていることが多い。そのような場合、方策のパレート解の集合を示し、どのようなトレードオフがあるかを見える化できれば、実際の方策決定に大いに役に立つ。このためには多数の方策パラメータの組み合わせからパレート解集合を十分な数求める必要がある。これを実現するため、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化手法である NSGA-II を改良し、OACIS の上でパレート解探索を行えるモジュールとして実現した。このモジュールでは、1 つのシミュレーションパラメータ設定を 1 つの個体とし、各々の個体についてシミュレーションを複数回行った時の評価値(ベクトル)をその個体の評価とする。最初はこのような個体を一定数(population)生成し、評価値によりパレートランキングをつけ、適合度とする。この適合度を用いて、また、混雑距離により個体の分散をはかりながらトーナメント選択を行い次世代に残す個体を選択、交差・突然変異により新たなパラメータ設定を作り、次世代集団を構成する。モジュールではさらに、マルチコアによる並列性を有効利用するために、一世代の全個体のシミュレーション完了を待つことなく、一定割合完了した時点で次世代を作り出す方法を実装している(図 6)。

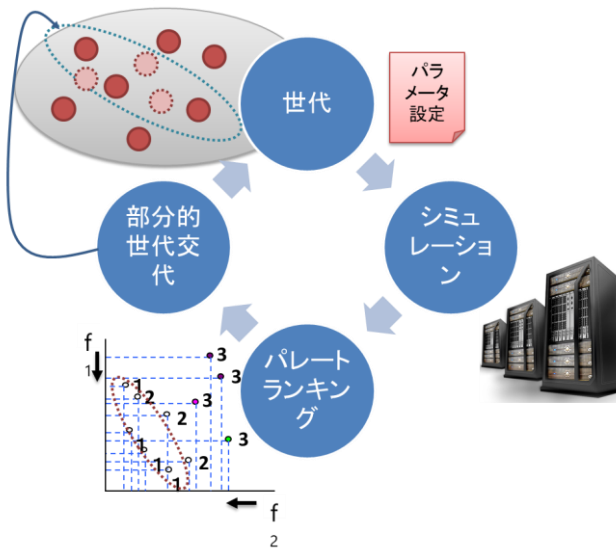


図 6 改良型 NSGA-II による OACIS モジュール

さらにこの改良型 NSGA-II モジュールは、より大規模な探索にも適用するため、CARAVAN 用への移植も行った。CARAVAN では、X10/MPI による並列実行により、数千を超える並列実行あるいは  $10^7$  以上のシミュレーション試行が可能となる。多目的最適化では最適化軸の次元が増えると、

必要となる population 数も指数関数的に増える。このモジュールはそのスケールに対応するためのものである。

### (3) パラメータ分析・推定機構

交通シミュレータをはじめとする社会シミュレーションにおいて管理機構を通じて容易に、そして、動的に、データ同化のためのパラメータの設定と探索を行うため、実験パラメータ(スレッド数や時間刻み等)と環境パラメータ(道路ネットワークの配置および状態等)、モデルパラメータ(個性や速度モデル等)に階層化した設計を行い、その中から XML 形式で指定した必要なパラメータを選択的に変更し、条件の異なる実験を順次実行可能とする実装を行った。

これらの機能の検証として、4.3③(2)で取り上げる都市交通シミュレータ (IBM Mega Traffic Simulator) について、東京を含む一都四県からなる首都圏(道路数:2,465,767、交差点数:891,335)について東京都市圏交通計画協議会の集計による時間毎小ゾーン毎の交通需要データを入力として交通シミュレーションを実行し、昼間 12 時間の交通量について交通センサス観測値との比較を行い、相関係数 0.7 と十分な精度を確認した(図 7)。

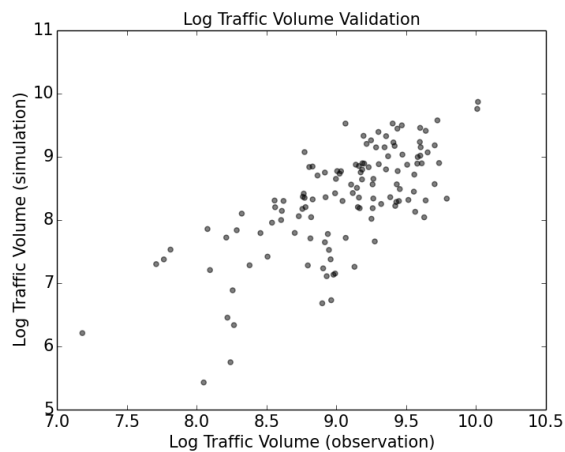
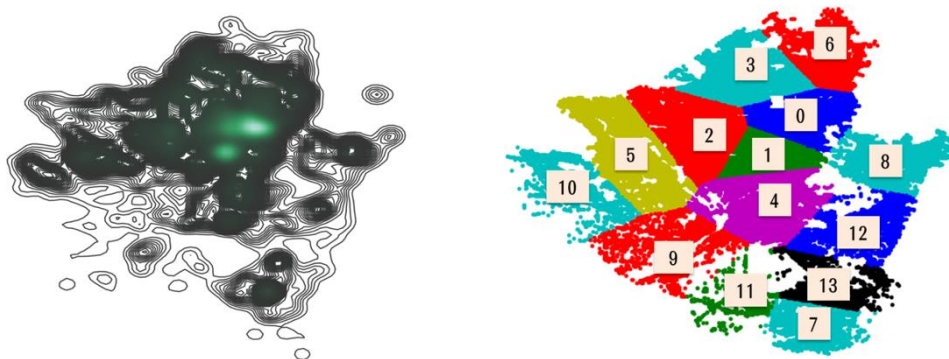


図 7 交通量対数値についてのシミュレーション結果と交通センサス観測値の比較

さらに、社会シミュレーションの応用を広げるために、車両挙動などマイクロエージェントの挙動モデルをデータより構築する手法について研究開発を行った。具体的には、プローブデータに基づいたバスの走行モデル、営業戦略の個性性を表現したタクシーの走行モデルを構築し、異種走行モデル混在型の大規模都市交通シミュレーションを実現可能とするための技術開発を行なった。

タクシーの走行を模擬するマイクロエージェントモデルの構築では、京都市内を走行するタクシーのプローブデータを利用し、1) 全タクシーに関する主たる営業地域の分類の獲得、および 2) 各タクシーの顧客獲得行動の分析に基づく営業モデルの選択・割り当てを行うことで、タクシーの実際の挙動に適した個性性を与えることを可能とした。まず、1)に関して、タクシープローブデータに対してカーネル密度推定を行い、トリップの発生地点(顧客の獲得地点)の分布を確認すると(図 8-a)、トリップの起点に関していくつかの密集地が存在しており、タクシーが特定の地域に拠って乗客を獲得している可能性が示唆された。そこで、トリップの起点に Mean-Shift 法を適用してクラスタリングを行い、京都市内でのタクシーの営業地域の分類を獲得した(図 8-b)。2)では、まず、獲得した各々の営業地域で顧客を獲得する割合を特徴量として各タクシーの営業の傾向を表現する。さらに特徴量に対して Affinity Propagation を施し、タクシーの営業傾向を 10 個のクラスタに分類し、「繁華街を中心とした営業を行う」「ターミナル駅を中心に都心部で営業を行う」といった特徴の説明をしやすい営業行動を抽出することができた(郊外に出るパターンを除いた、営業傾向毎の顧客獲得地域を図 8 に示す)。本課題では、抽出された営業行動のクラスタそれぞれに対してエージェントモデルを構築し、各々のタクシーに関して、その走行データによって分類されたクラスタに該当するモデルを、実際の挙動の再現に適したタクシーエージェントモデルとして選択し、実装した。



(a) カーネル密度推定による顧客獲得地点の分析 (b) Mean-Shift 法を用いた営業地域の分類分析

図 8 プロブデータに基づく営業地域の分析

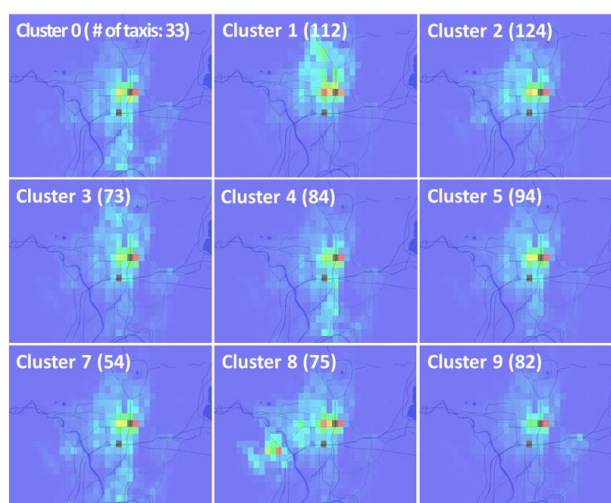


図 9 タクシーの営業傾向毎の顧客獲得地域

#### ④ 成果の位置づけ

ここで整備したシミュレーション結果管理マネージャおよびシミュレーション実行計画機構については、本課題で計画した所定の機能・性能を満たすことができました。性能評価の詳細については、4.3 節のアプリケーションのところでも議論するが、 $10^7$  を超える組み合わせの条件でのシミュレーション実行や、100 以上のパラメータを同時に探索する問題など、社会シミュレーションの実用化に必要な機能・性能・頑健性を提供できたと考えられる。また、コマンドラインによるシステム起動のほか、Web ベースのインターフェースを用意したことにより、必ずしも HPC に詳しくない社会学者などのユーザに、シミュレータ込みのパッケージとして提供できる環境を整えることができたことは大きい。

成果物の公開については以下のようにしている。

- 公開済みのもの
  - OACIS (version 1、version 2)
  - 三分探索直交化 OACIS モジュール (OACIS 付属モジュールとして)
- 公開予定のもの
  - CARAVAN
  - 改良 NGS-II モジュール

### 3.2 MASS 分散実行ミドルウェア

### ① 研究のねらい

MASS では規模の大きさがシミュレーションの精度や挙動に大きく影響を与え、また、個々の要素であるエージェントの行動を決定する思考を深く精密に模倣するなど、指数的に増大する計算力が必要となる。この計算量の増大に対処しつつエージェントシミュレーション構築に適した HPC 向けプログラミング・実行環境を整備する。

### ② 実施方法

「MASS 分散実行ミドルウェア」では、マルチエージェントシミュレーションで重要となるエージェント間通信を考慮に入れた大規模マルチコアアーキテクチャへの負荷分散を自動化する機能を実現した。これに向けて、以下の項目を開発した。

#### (1) 分散エージェントシミュレータのための言語処理系の移植および高速化(担当:鎌田グループ)

PGAS 型並列プログラミング言語 X10 を京コンピュータ上に移植した。その後、エージェントシミュレーションを用いて、将来大規模かつ不規則な問題も効率的に処理できるように、動的負荷分散ライブラリや分散集合ライブラリといったミドルウェアの研究開発を進めた。並行して、東大和泉グループで開発された人工市場シミュレーション基盤(Plham)の大規模並列化を題材として、ミドルウェアのチューニングや機能増強をすすめた。

#### (2) エージェントシミュレーション分散実行基盤(担当:IBM グループ)

並列分散環境において X10 上で動作するエージェントシミュレーション実行基盤として、XAXIS 等をベースに、エージェント間通信によるコア間通信の最小化などの大規模 MASS に必要となる負荷分散機能を強化し、本課題で検証用に用いる各アプリケーションシミュレーションとのアダプタ開発を通じて、超並列分散 MASS 開発のための設計思想を構築し、汎用 API を整備した。

### ③ 実施内容と成果

#### (1) 分散エージェントシミュレータのための言語処理系の移植および高速化

##### (a) X10 処理系の京コンピュータへの移植【対応版は IBM で公開中】

本課題では、超並列分散 MASS や経済シミュレーションの記述言語として X10 を利用しており、X10 の京/FX10 への移植作業を初年度(H24 年度後半)から開始した(図 10)。native 版については、2013 年度中に対応を完了・公開(ver. 2.4.1)し、また、managed 版については、CREST 千葉チームと連携する形で京上での Java の動作確認をおこない、2014 年に対応版 X10 の公開(ver. 2.5.0.1)が行われている。native 版については、SC13 にて開催された HPC Challenge Class 2 Awards に、IBM Watson グループに協力する形で参加し、finalist に残っている。当該コンテストでは、HPC Challenge で従来利用されている FFT、HPL (LU)、Stream 以外に、Unbalanced Tree Search (UTS) などの不規則計算を扱うプログラムを提出しており、このプログラムで用いた Global Load Balancing Library (GLB) を用いた自動負荷分散については、その性能評価について IBM Watson グループと共著の形で発表している(図 11)。GLB は、X10 ver. 2.5.0 から標準ライブラリとして提供されている。

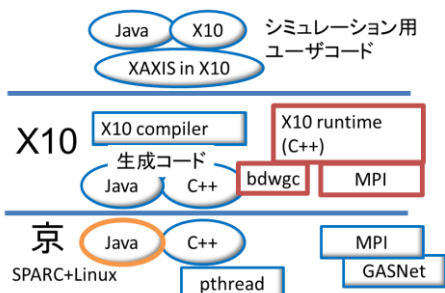


図 10 X10 の京/FX への移植

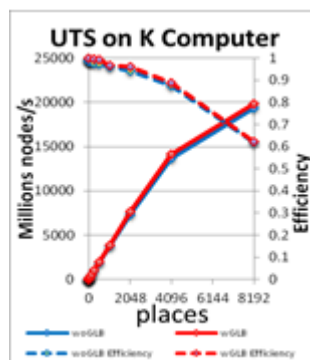


図 11 X10 の京上での性能評価

(b) 人工市場シミュレーション・ソフトウェアの並列化【公開中】

X10 の適用例として、市場シミュレーションプログラムの大規模分散並列化に向けた取り組みを開始している。本シミュレーションでは、市場参加者がエージェントとして扱われ、市場との間で価格情報および注文のやり取りを行う。Plham ではシミュレーションモデルと実行モデルの分離を図り、一般のユーザは並列分散環境を意識したプログラムを書く必要がない。計算のスケジューリングや並列実行時のデータの分散配置は、Plhamが提供する実行モデルによって行われる。並列実行モデルは、エージェントを各計算ノードに分散配置しており、ユーザは実行モデルごとに定まる市場情報などの伝搬遅延を許容することで、問題や環境に応じたシミュレーションの大規模並列実行が可能となる。

本シミュレーションを並列化する上での課題は、高頻度裁定取引に相当する市場への低遅延アクセスを要求するエージェントと、モンテカルロシミュレーションや非線形最適化などをおこなう多くの計算資源を必要とするエージェントが混在している点にある。まずは本シミュレーションの性能傾向を分析するため、裁定取引部を逐次実行し、他の部分を複数ノードで並列実行するという比較的単純な形で並列化し、100 銘柄・5 万エージェントのシミュレーションを対象に京コンピュータ上で台数効果を測定した。結果、並列実行部は 256 ノードまで順調にスケールしたが、一方で、通信および裁定取引部が将来的にボトルネックとなることが判明した。

これらの知見を受け、集団通信を用いた通信の高速化などをおこなうとともに、裁定取引部と一般エージェントの並列実行が可能となるように、改良版並列実行モデルを作成した(図 12)。あらたに長期型エージェントを導入し、裁定取引との並行実行をおこなうと同時に、短期エージェントとの間で通信と計算のオーバーラップをおこなっている。これらの取り組みにより、高頻度取引を行わなかった場合は、640 銘柄・32 万エージェントのシミュレーションを京コンピュータ 2048 ノード上で実行した際、1サイクル1秒程度で処理することが可能となっている(図 13)。

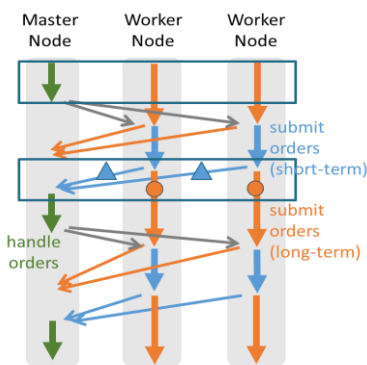


図 12 Plham の改良版並列スケジューラ

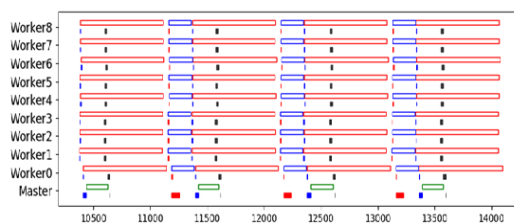


図 13 Plham 改良版スケジューラ実測タイムチャート(640 銘柄、32 万エージェント) (京コンピュータ 2048 ノードから一部抜粋)

(c) 動的負荷分散ライブラリのマルチスレッド化・マルチステージ機構導入【公開予定】

アプリケーション検討を通して、大規模エージェントシミュレーションを大規模分散環境において効率的に進める上で、エージェント配置の最適化や、通信遅延隠蔽のためタスクスケジューリング、動的負荷分散技術などの重要性が分かってきた。このため、上記市場シミュレーション開発と並行する形で、タスクの大域的スケジューリングおよび動的負荷分散(再配置)を実現するための研究を開始した。第一段として、X10 で提供される動的負荷分散ライブラリ GLB のマルチスレッド化及びマルチステージ機構の導入を試みている。マルチスレッド化は、現在普及が進むマルチコア計算環境においてノード内データ共有を進めるために必要であり、また、マルチステージ機構は、タスクに実行ステージを割り付けることで、タスクの実行順序を大域的に制御するためのものである。現時点で 256 ノード程度まで順調な台数効果が達成されており、また、ステージ導入のコストは概ね 5%以下であった(図 14)。今後、さらなるスケールアップやランタイムコストの削減を図ると同時に、実アプリケーションへの適用を通して API の改善をおこない、ライブラリの拡充を進めていく予定である。

(d) オブジェクト要素に対応した再配置可能分散集合ライブラリ【公開予定】

Plham の並列化においてもそうであったように、エージェントシミュレーションの大規模並列化を達成するためには、単純にエージェント間のメッセージのやり取りを実装するだけではなく、エージェントの分散配置やキャッシュデータの利用、通信や計算のオーバーラップといった様々な処理がしばしば必要となる。一方で、オブジェクトを対象とした分散データ構造の管理はしばしば煩雑な作業を必要とする。加えて、ノード通信と計算のオーバーラップや、マルチコア CPU を用いたノード内並列処理など、スレッドや通信のスケジューリングも複雑となりがちである。

本ライブラリは、分散集合データ構造の要素であるオブジェクトの分散配置状況を管理し、要素の再配置機能やキャッシュの配置・更新機能を提供する。また、現在広く普及しているマルチコア CPU を考慮したデータ並列処理および分散集合の並列構築をサポートする(図 15)。高い抽象度で、集合要素の再配置や、並列データ処理および並列データ構築を記述可能なため、通信と計算のオーバーラップなども容易に実現することが可能である。将来的には、ステージ機能つき動的負荷分散ライブラリとの協調動作などもサポートする予定である。本ライブラリでは、現在、分散配列やハッシュ系データ構造を提供しており、Plham の実装に適応中である。現在、ライブラリの公開に向けて各種機能の安定化を図っている。

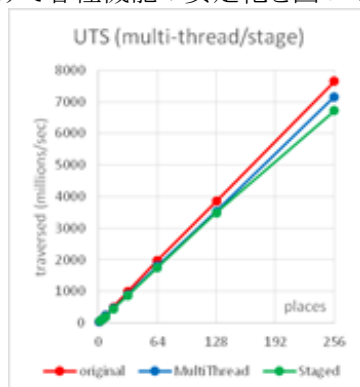


図 14 動的負荷分散ライブラリの性能評価

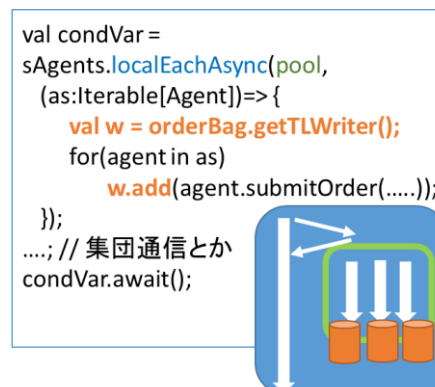


図 15 分散集合ライブラリ利用例

(2) エージェントシミュレーション分散実行基盤

エージェントシミュレーション分散実行基盤について、アプリケーション層とミドルウェア層が密結合であった従来の設計を、下位のレイヤーと独立してアプリケーションを開発できるよう粗結合なアーキテクチャを設計し、メッセージングパッシングインタフェースを実装し、その他に、性能最適化として、同期頻度をアダプティブに変更することにより、同期コストのオーバーヘッドを削減する手法を提案し、実装を行うと共に、X10 の最新版への対応を行い、京/FX10 上での動作を確認した。また、大規模環境における実行性能を示すため、全日本道路ネットワークと 1000 万車両、そして 256

ノードから構成されるスーパーコンピューターを用いて評価を行い、Java 版交通シミュレーターの主要機能を X10 で書き換えたテスト用アプリケーションを作成し、Native X10 では実時間の 10 倍のリアルタイム性を実現した。同様に BlueGene/Q においても動作検証を行った。さらにスレッド間同期待ちによる実行速度およびスケーラビリティ低下への対策として、応用社会シミュレーションの精度とのトレードオフを考慮しつつ動的に同期頻度を変動させるアルゴリズムを実装した(図 16)。

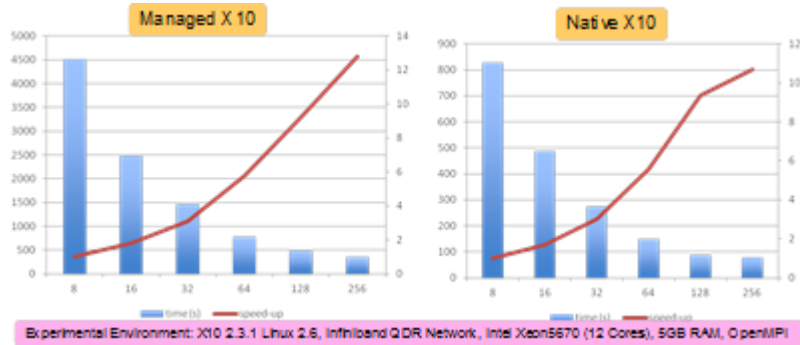


図 16 Java 版と Native 版のスケーラビリティ

計画当初、本フレームワークは、IBM X10-based Agents Executive Infrastructure for Simulation (XAXIS) という名称であったが、これを X10-based Agent Simulation on Distributed Infrastructure (XASDI) と変更した上で、2016 年 3 月よりオープンソースソフトウェアとして、サンプルアプリケーションおよびチュートリアルと共に GitHub のソースコードレポジトリ (<https://github.com/x10-lang/xasdi>) 上に公開した。広い範囲の研究者および開発者に使ってもらえるようサンプルアプリケーションは追加を続けており、現在は、複数の種類のメッセージ交換を行うもの、複数ノードをまたがったメッセージ交換およびエージェント移動を行うもの、さらに、簡単な社会シミュレーションの例としてオンラインオークションのシミュレーターを提供している。

開発および実行環境を容易に構築し試行を行えるようソースレポジトリ以外にも二通りの導入手段を準備した。一つは、Cloud Foundry (オープンソース PaaS ソフトウェア) 上のサービスとして実装し、社会シミュレーションをエージェント基盤サービス上で実行できるようにしたものであり、エージェント基盤としての性能評価として、一千万エージェントを 3-100 ノードに分散し、各ノードからのブロードキャストとリプライに関して実行速度を計測した。ノードの増加とほぼ比例してメッセージが増えるが実行時間は増えず、良好なメッセージング性能が確認された。もう一つは仮想環境 Docker において必要となる言語やライブラリを全て含んだイメージを構築するための手順を用意した(図 17)。構築されたイメージから作成した実行コンテナとホストマシン間でファイルを共有することにより、ホストマシン上で Eclipse を用いたアプリケーション開発を行い、そのままコンテナ上でシミュレーションを実行できることを確認した。



図 17 Docker 上に構築された XASDI ソフトウェアスタックおよびサンプルアプリケーション



### 3.3 アプリケーションシミュレーション

#### ① 研究のねらい

本課題は、社会シミュレーションという応用に強く根差したフレームワークの開発を目標とすることから、上記4.1、4.2のサブテーマは、実用性・有用性を担保しながら、汎用性を高めることを目指している。このため、複数のアプリケーションに適用しながら開発を進め、フレームワークの実用性・有効性を担保していく。

#### ② 実施方法

開発するフレームワークの機能を検証するために、人流・交通・経済などの社会現象を扱う MASS アプリケーションを各々複数取り上げ、実用的な性能を示すことを確認した。最終的には、以下のような規模のシミュレーションが実行できるプラットフォームを構築することを目指した。

##### (1) 人流シミュレーション(担当:野田グループ、理研グループ、伊藤グループ)

首都圏等の大都市での帰宅困難者の行動や、数百万人規模のイベントでの人流、百以上の設定パラメータについて状況を網羅しつつ、ロジスティクスや情報流通を含めた系の挙動の分析・見える化する。

##### (2) 交通シミュレーション(担当:IBM グループ、服部グループ、理研グループ、伊藤グループ、野田グループ)

京阪神や首都圏などの大都市地域を対象として、複数の運転モデルに基づく100万台以上の車両が同時に移動する交通現象のシミュレーションを行う。

##### (3) 経済シミュレーション(担当:伊藤・和泉グループ、鎌田グループ)

ゲーム理論などに基づき経済的な市場を模したモデルを、1016 通り程度の市場戦略の組み合わせ条件を網羅しつつ、戦略の組み合わせと市場全体の安定性の関係を分析する。

また、4.1、4.2 で開発したフレームワークと組み合わせるパッケージ化し、研究コミュニティへの普及および継続的な機能強化を進めた。

#### ③ 実施内容と成果

##### (1) 人流シミュレーション

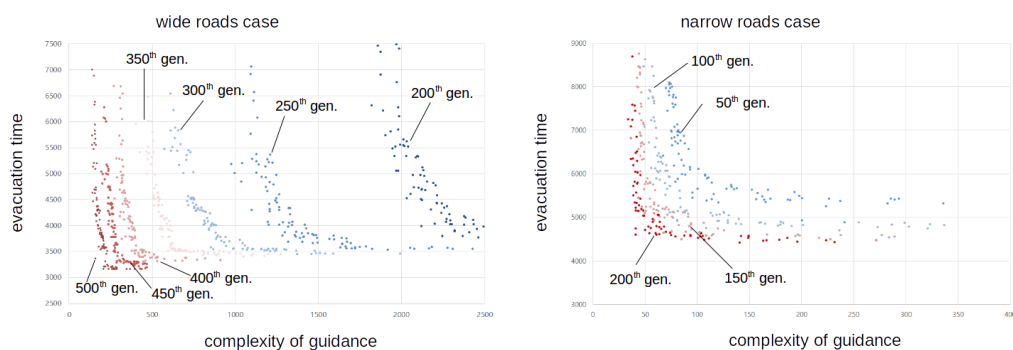
##### (a) 大阪における津波避難と多目的最適化によるトレードオフの見える化

4.1 で開発した MASS 計画・管理モジュールの機能検証を兼ねて、大阪市淀川地区(図 18)の津波からの避難指示を題材とした多目的最適化の実験を行った。実験計画のための OACIS モジュールとしては、改良型 NSGA-II モジュールを用いた。シミュレーションの設定としては、淀川地区の地図(2933 ノード 8924 リンク)にいる 49276 人の避難者が、86 か所の避難場所に避難を行うものとする。可変の設定パラメータとしては、当該地区の 73 の町丁目の各々について人数を 2 つのグループに分け、おのおののグループに対し1つの経由点と1つの避難所(目的地)を選択する。経由点の候補の数は 533 か所とした。1 町丁目につき、グループの人数比・2 か所の経由点と 2 か所の避難所の 5 パラメータがあり、全体ではパラメータの数はトータルで 365 個であり、探索空間としては、 $R^{73} \times 533^{146} \times 86^{146}$  となる。評価軸としては、避難時間と避難誘導ルールの複雑さの2つを最小化するものとする。この後者については各町丁目の 2 グループの人数比の情報エントロピーとして数値化した。これは、1 地区の人はできるだけまとめて同じ方向に避難指示した方がいいという原則を連続値として反映するためである。

図 19 は、同モジュールにより避難指示の設定が多目的最適化されていく過程を示している。各世代は L 字型に分布しており、避難時間最小化するには複雑な避難指示を必要とすること、また、簡潔すぎる避難指示では避難時間を十分短縮できないというトレードオフ構造を抽出できるとみなせる。



図 18 避難シミュレーション対象地域



(a) 道幅 5m とした場合

(b) 道幅 2m(歩道のみ)とした場合

図 19 改良型 NSGA-II モジュールによる多目的最適化の様子

(b) 金沢における津波避難の網羅実行による要因分析と NIGECHIZU SIMULATOR

OACIS の網羅的機能検証のための事例としては、金沢を対象地域とした網羅的避難シミュレーションを実施した。シミュレーション条件としては、橋補修箇所 11 か所、除雪候補地 11 か所を定め図 20)、その候補のすべての組み合わせ( $2^{22}=4,191,304$ )について 2 つのクラスタを用い、320 並列でシミュレーションを行い、避難時間に対する要因分析を行った。これにより、別途行っていた 2 万通りのシミュレーションでは分離できなかった主効果を発見できるなど(図 21)、実用上有益な情報を半自動で得られることを示した。

この金沢の避難シミュレーションについては、NIGECHIZU SIMULATOR として、以下のイベントにおいて一般向けに展示を行い、市民などへの防災の啓発活動として活用された。

- 金沢 21 世紀美術館「3.11 以後の建築」  
2014 年 11 月 1 日-2015 年 5 月 10 日。延べ利用者数:約 8000 人
- G 空間 EXPO2014:  
2014 年 11 月 13 日-15 日
- 日建設計 NSRI フォーラム  
2015 年 7 月 28 日
- CEATEC 2015  
2015 年 10 月 7 日-10 日
- 水戸芸術館  
2015 年 11 月 1 日-2016 年 1 月 31 日



図 20 金沢での避難シミュレーションの対策候補 (左：橋の補修、右：除雪地域)

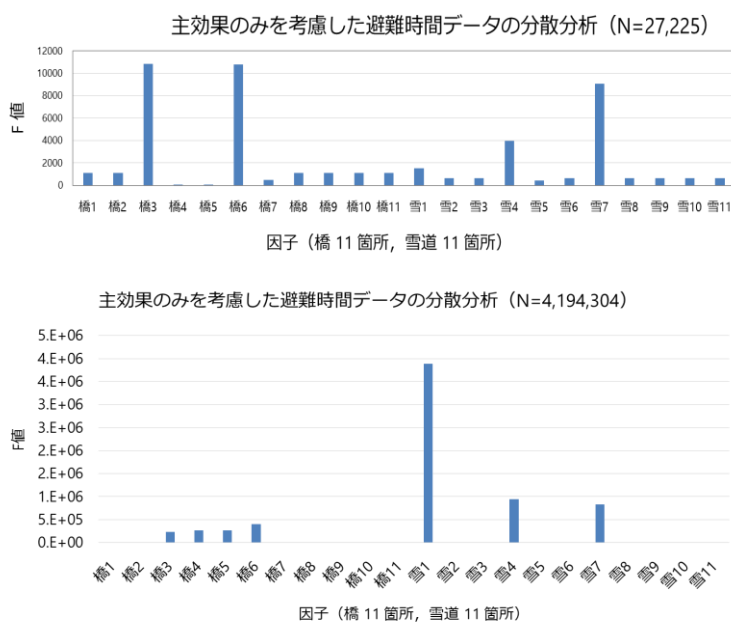


図 21 網羅シミュレーションによる要因分析詳細化

(c) 大規模商業施設での人流シミュレーション

大規模商業施設における経済活動と歩行者行動を融合したハイブリッドシミュレータについて、さまざまなスケールの商業施設における実験検証のために、施設マップおよび商品との関連づけを半自動で行う入力ファイル定義および滞在時間や購買数等の結果出力の可視化のためのプログラムを開発し、国内最大級のショッピングモールに相当する規模(店舗数 64-256、年間入場者が数千万人相当(1時間に3,600~10,000人))での実験を行なった(図 22)。さらに、10 GbE およびインフィニバンドで接続された NeXtScale nx360 M4 クラスタを用いて分散シミュレーションのスケラビリティについても確認を行なった(図 23)。さらに、大規模かつ各エージェントがモール内の複雑な意思決定をするために保有データが肥大化した際に、従来のエージェント全体のノード間移動からの改良として、相互作用に必要な最低限のデータのみを shadow agent として各ノードに分散する並列分散シミュレーション手法を考案し、実装した(図 24)。

また、ハイブリッドシミュレータの複数の商業施設を含む商圈における混雑緩和や避難に関するシミュレーションへの応用のために、購買行動を含まない歩行者移動モデルのみを用いた東京駅周辺のビル配置におけるシミュレーションを行なった(図 25、図 26)。この際、一店舗と異なり、広域でのシミュレーションとなることから時空間に関するパラメータ調整と、欠損を含む混雑の観測データを再現するためのビル(ゾーン)毎の魅力度パラメータの推定も行なった。

このほか、任意の市街区におけるシミュレーションの適用のために Open Street Map から建造

物と道路網の情報を抽出して入力ファイルの構築ツールの開発と、シミュレーションプログラムにおけるゾーン(店舗や通路)の長方形から一般のポリゴンへの拡張を実装し、新規の場所で容易に適用・実用化可能なシミュレーションフレームワークとして整備した(図 27、図 28)。

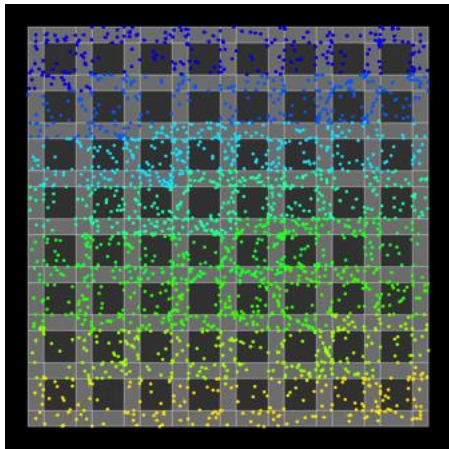


図 22 大規模商業施設の分散シミュレーション

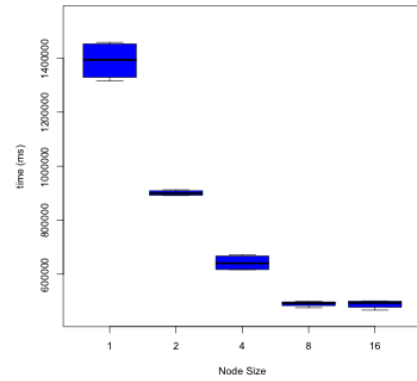


図 23 1時間1万エージェントでのマルチノード実行時間

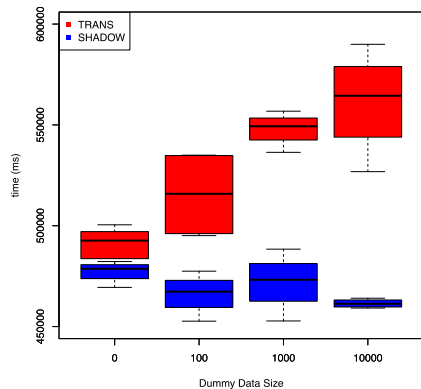


図 24 従来手法(TRANS)と新手法(SHADOW)による

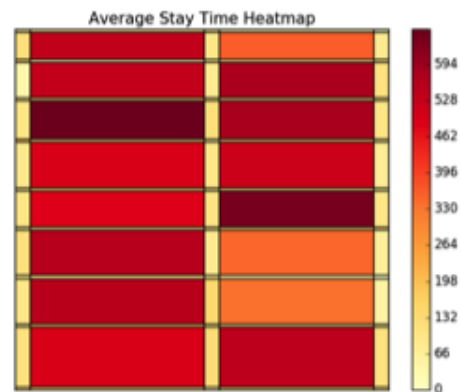


図 25 歩行者シミュレーション結果(平均滞在時間)



図 26 東京駅周辺のビル配置



図 27 仙台の街区とビル



図 28 東京の街区とビル

(d) 人流現象の自己駆動粒子系としての理論解析

さらに人流については、人流現象を抽象化した自己駆動粒子系としての理論的解析を、網羅シミュレーションを併用して進めた。自動車・歩行者や動物ほか、自ら移動する対象を記述するエージェントモデルとして研究が進められている自己駆動粒子系では、群や運動パターンの自発的形が基本となる。これまでの研究では、それぞれの目的地に向かって他のエージェントと排他的に相互作用をしながら運動するというモデル (social-force model) が良く使われてきたが、集団運動やパターンの由来に各エージェントのもつ目的地と他のエージェントとの相互作用との2つが混在していた。これに対し、目的地は持たないが、自分の向かいたい方向は持つエージェントからなるモデルを提唱した。このモデルでは自分の向かいたい方向は一定ではなく、現在の進行方向に向かって一定の時間  $\gamma$  で緩和すると仮定した。このモデルが2次元的な集団運動を形成する条件を明らかにし(図 29)、群衆や動物の群れを記述するモデルとして整備した。その結果、集団運動が発生する条件は、エージェント密度  $\Phi$ 、緩和時間  $\gamma$  に対して図 30 の様になることが判明した。

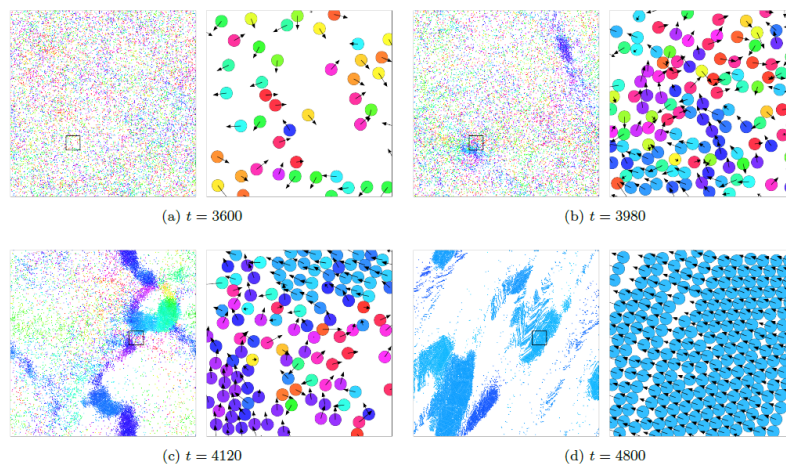


図 29 集団形成ダイナミクス。色は運動の向きを表わす。(a)から(d)へと時間発展する。

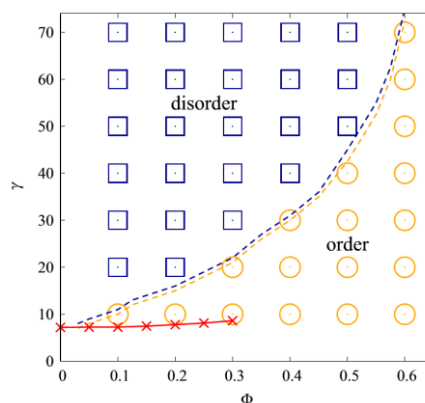


図 30 歩行者の密度  $\Phi$ 、方向緩和係数  $\gamma$  により、秩序ある集団歩行になる領域 (order) と、ばらばらに右往左往する領域 (disorder) との2状態が現れる。図中、赤線で示した線は低密度極限での近似理論から予想される2状態の境界を示す。

(2) 交通シミュレーション

(a) 大規模交通シミュレータによる都市交通制御計画支援

分散シミュレーション基盤 XASDI 上の大規模アプリケーションとして、大規模交通シミュレータの開発と実験を行った。都市交通シミュレータ (IBM Mega Traffic Simulator) について、広島市における複数の道路規制の選択および高速道路新設に伴う交通量変化の実験と可視化を行った。また、交通シミュレータの精度向上、機能拡張の一環として、交差点挙動の改良およびマルチモーダル化と信号制御を考慮した柔軟性を持つ設計と実装を行った。特に信号制御に関して、高度

な制御モデルのためのフレームワークの整備、交通量に応じて動的に信号の制御タイミングを変更するアルゴリズムの実装、および交通流推定モジュールとの連携と実験を行った。シンプルな信号制御により、ナイロビ市街で信号間隔が固定の場合と比較して旅行時間が 7.2%ほど改善される事を交通シミュレーター上で確認した。発展途上国におけるウェブカメラからの低解像度の画像解析と非観測領域の交通量の推定技術を利用した動的な信号制御フレームワークをシミュレーターを用いて評価した。シミュレーションにより固定時間の信号制御方式と比較して、ウェブカメラが交差点から 500m 離れた場所に設置された場合においても平均移動時間を 20.6% 削減することが可能な事を示した(図 31)。

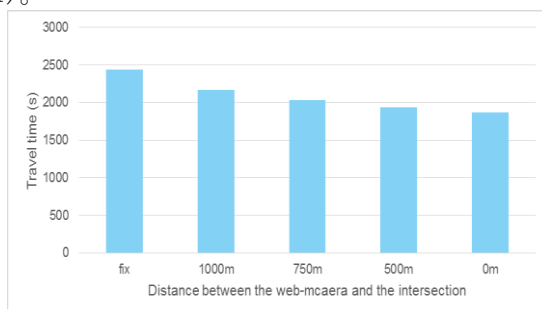


図 31 交差点からの観測地点の距離を変えた情報による信号処理と平均旅行時間

#### (b) 全世界規模交通シミュレーション

大並列計算機で実現できる自動車交通シミュレーションの規模を実証するために、道路地図のレベルで領域分割して並列化を行い、それにより全世界規模のシミュレーションの可能性を示す、自動車交通シミュレーションのベンチマークプログラムを開発した。このプログラムは、各自動車は交差点で経路をランダムに選んで運動を続けるという交通モデルをシミュレートするものである。道路地図として Open Street Map を使い、京コンピュータにより並列性能を測定した。その結果、日本全国(5,887,609 交差点、総延長 1,284,352Km)に 11,775,218 台の自動車を走らせた場合、実時間 3,600 秒分を京コンピュータの 1/4、20,736 ノードを使って経過時間 386 秒間でシミュレートできた。また、世界全体(79,441,144 交差点、総延長 30,887,952Km)に 100,000,000 台の場合、実時間 100 秒分を京コンピュータの 1/4、20,736 ノードを使って経過時間 116 秒間でシミュレートできた。以下にシミュレーションの一部を示す(図 32、図 33、エラー! 参照元が見つかりません。)。シミュレーションは全世界のすべての道路を同時に更新しているが、解像度の都合で一部分のみ示す)。



図 32 : 全世界交通シミュレーション  
(ローマ部分)



図 33 : 全世界交通シミュレーション  
(東京部分)

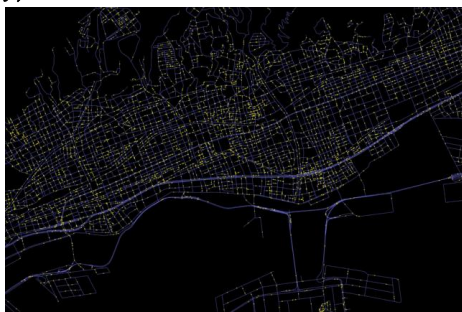


図 34 : 全世界交通シミュレーション (神戸部分)

#### (c) 交通シミュレーションによる都市交通の渋滞因子分析

このほか、マイクロシミュレーションを網羅的に分析することでマクロレベルの特徴解析が可能であることを示すため、都市規模の交通シミュレーションとその分析を行った。都市規模の道路ネットワーク上の自動車交通の交通流には不安定性が内在しており、渋滞転移が不連続的に生ずる理論的な可能性を示した。この不安定性・不連続性を実際の交通データから直接解明することは再現性・実現数の制約から困難と思われるため、自動車シミュレーションによる解析が有利であると考えられる。現実の道路ネットワークには、幹線・バイパス・枝線と階層化し、役割を分担している。まず、都市レベルの交通を考える上で、重要な道路・主要な道路を明らかとするために、ODに対して一定の分布の下、都市交通をモンテカルロサンプリングにより繰り返しシミュレートし、因子分析による多変量解析を試みた。昨年度開発した神戸市の交通シミュレーターを用いて試みた結果、モンテカルロサンプル数を増やすとともに、図 35 に示す数の因子が得られた。ここで神戸市の1日の交通量を100,000トリップとし、6時間分についてシミュレートした結果、500台以上の自動車が通過した2,097の道路セグメント(道路のうちで交差点から隣の交差点までの部分)の流量相関を使って因子分析を行った。使った神戸市の道路ネットワークは、35,952道路セグメント・14,438交差点よりなる。下図より得られた因子数はサンプル数の0.36乗程度で増加してゆく様子が見られる。得られた因子の寄与率は、神戸市の自動車交通を構成する際の重要性を意味する。これらの因子は神戸市の自動車交通の巨視的モデルの構築への足がかりとなると同時に、交通シミュレーションの予測精度を一層高める手法となりうるものと考えられる。

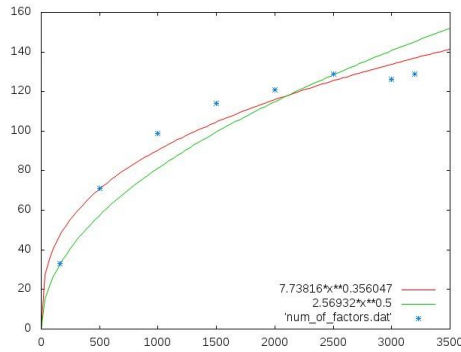


図 35 モンテカルロシミュレーションにより得られた神戸市の自動車交通の因子の数。横軸はサンプル数、縦軸は因子数を表わす。

(d) タクシープローブデータからの運転者モデル構築

さらに、4.1③(3)で示したタクシープローブからの運転モデル獲得手法について、構築されたタクシーエージェントを含む計 20 万台の車両による交通シミュレーションを行い(図 36)、再現した交通流において、都市内でのタクシーの分布状況を検証した。営業地域に偏りのないモデルを与えたタクシーエージェント(図 37-a)に対して、市内中心部から北部での営業が多いモデルを与えた場合(図 37-b)、また市内南東部での営業が多いモデルを与えた場合(図 37-c)では、タクシーの走行頻度が高い経路(水色の部分)に違いが見られた。大規模都市交通シミュレーションにおいて、この特性を組み込んだモデルを導入し、走行の傾向を再現できる可能性を本課題では示すことができた。しかし、異質なモデルを導入した結果、現実近似したシミュレーション結果を得るために、各々のモデルをどのような割合でエージェントに割り当てるべきかなど、設定すべきパラメータの適切な値の決定問題を新たに考慮する必要性が生じている。また、経時的に変化する営業の傾向を再現するために、時間帯に応じて適切なエージェントモデルを選択し切り替える機構についても今後の課題となっている。

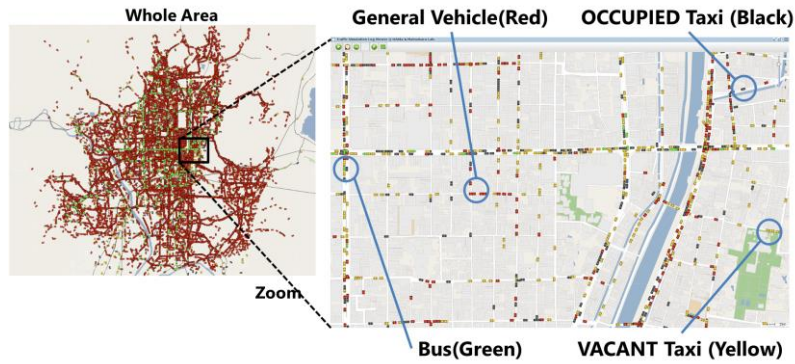


図 36 京都市交通シミュレーション実行例

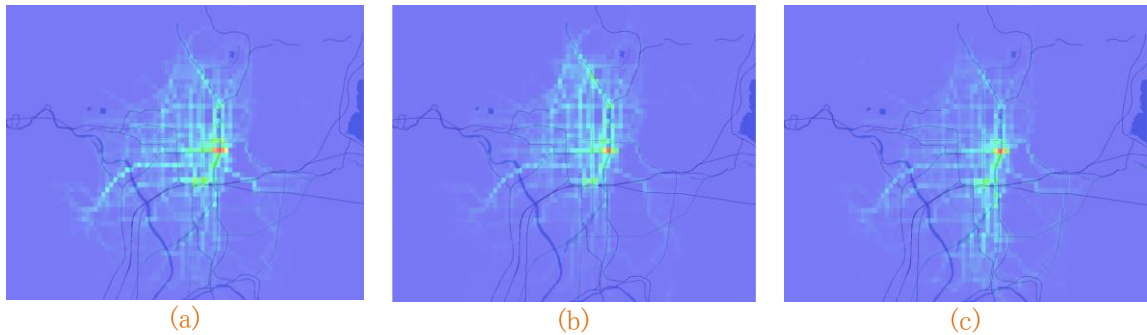


図 37 タクシーの走行頻度比較



### (3) 経済シミュレーション

経済シミュレーションは銘柄数を数千銘柄、取引エージェント数を数十万個のサイズの株式市場をシミュレートできるプラットフォーム・ソフトウェア Plham (Platform for large-scale and high-frequency artificial market)の開発を行った。Plham を用いて、金融実務者との共同により以下に示すような、シミュレーション結果が実際の金融市場の仕組みを変革した社会シミュレーション研究の卓越した成果を得た。なお、シミュレーションに際しては本課題で開発した実行管理システム OACIS を活用し、その経験を OACIS のデバッグ、ユーザインターフェースの改良、標準装備の解析・可視化アプリケーションの策定を理研の開発分担者らにフィードバックした。

#### (a)東京証券市場のティックサイズ変更の方針決定

1 銘柄を 1000 体の取引エージェントが参加する小規模な経済シミュレーションの試作プログラムを用いて約 100 通りのパラメータスタディを行った(図 38)。シミュレーション結果と実際の東京証券取引所での実データと比較して、株価の変動に対して適正なティックサイズ(最小価格単位)の閾値を求めた。本シミュレーション結果が、2014 年から実施された東京証券取引所のティックサイズ変更において 銘柄の絞り込みの方針に反映された。さらにシミュレーション結果を良い精度で再現する解析的な理論を開発し、シミュレーション結果の直観的な理解を助けるとともに、計算量を削減するシミュレーションモデルに途を付けた。

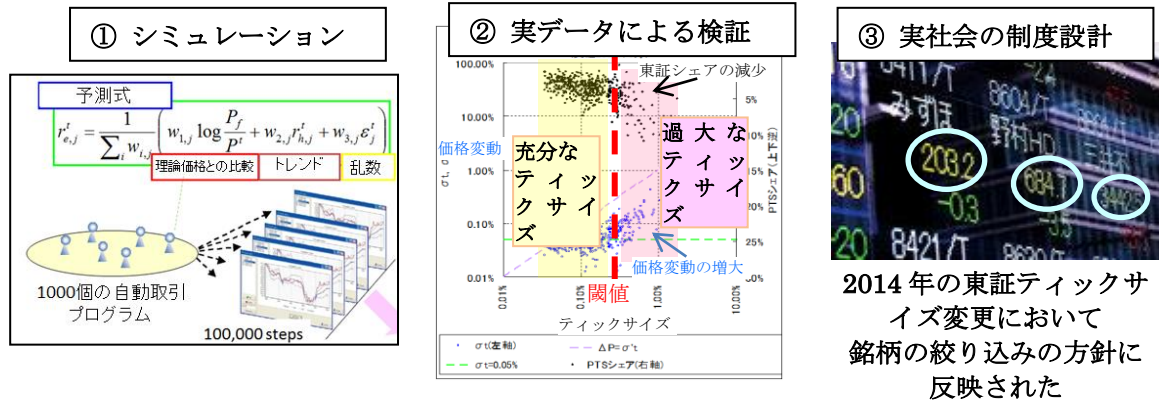


図 38 経済市場シミュレーションによるティックサイズ変更の影響分析

さらに、上記の現象を裏付けるため、理論的解析も進めた。具体的には、投資家のシェアへの線形・非線形選好のもと、取引値ティックサイズの調節による証券取引所間のシェア争奪戦での戦術を解明した。1例として図 39 に、シェアが大きくティックサイズが  $a$  の取引所に対して、ティックサイズ  $b$  の新しい取引所が現れた時にどのようなシェア変動が起こるかを、投資家のシェアの大きさへの選好が強い場合について解析を進めた。その結果、シェアの大きさへの選好が強い投資家のもと、ティックサイズ  $a$  の独占的な取引所に対して、 $b$  の新しい取引所が現れた場合のシェアの変動を示すことができた。左図はティックサイズ  $a$ 、 $b$  により現れる3種類のふるまいを示す。 $b > a$  の場合は、 $a$  の取引所の独占が続く。P では、 $b$  の取引所がシェアを奪う。Q では、 $a$  のシェアの高位が維持される。右図は、P、Q について、時刻  $t$  での  $a$  のシェア  $S_t$  が次の時刻  $S_{t+1}$  でどうなるかを示す。P は単安定、Q は双安定であることがわかる。

このような解析が可能となったのは、まず網羅シミュレーションにより全体的な傾向をつかむことができたことが大きく、社会シミュレーションによる条件網羅性の重要性を示す一例となっている。

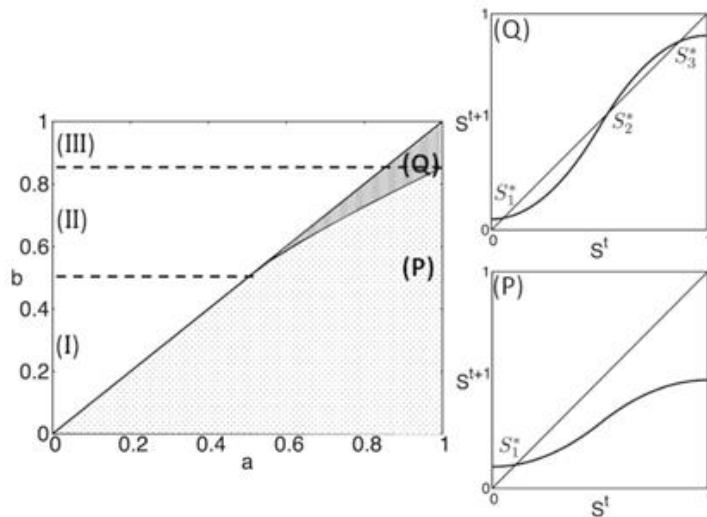


図 39 シェアの大きさへの選好が強いエージェントによる市場選択の安定性

(b)フラッシュクラッシュ(瞬間大暴落)の再現

基本モデルを並列処理言語 X10 を用いて移植し、通常の株式数十銘柄と平均株価と連動する指数銘柄の市場シミュレーションへと拡張したモデルを構築した。本モデルを用いて、裁定取引と呼ばれる高速な自動取引でよく用いられる取引戦略が、急激な価格変化を他の銘柄まで影響を与えてしまうことが起こりうる条件を調べた。社会シミュレーション管理モジュール OACIS を用いた約 5000 通りのパラメータ分析を行い、他の銘柄へ価格下落の伝播し瞬間大暴落(フラッシュクラッシュ)が生じる、取引戦略の組み合わせを特定した(図 40)。こうした下落伝播を防止する金融規制として取引停止制度の効果を検証し、伝播を有効に抑制できる条件と加速してしまう条件を分析した。

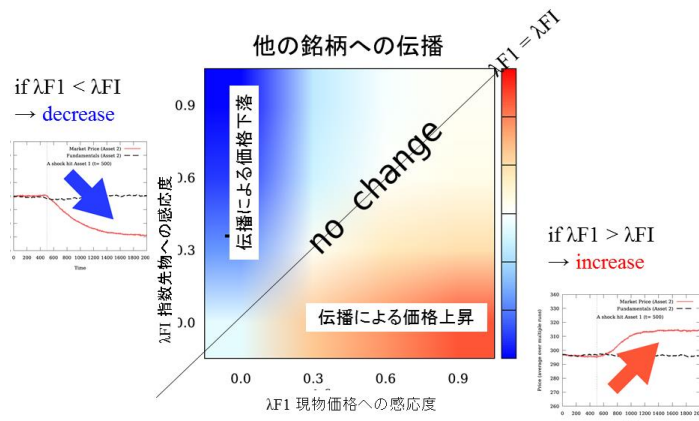


図 40 シミュレーションによる価格下落伝播の分析

(c)リスク管理規制が市場制度に与える影響の分析

東京証券取引所などの金融機関と共同で、自己資本比率規制などの大規模な金融規制を対象とした制度設計の検証を行った。その結果、自己資本比率規制に基づく市場リスク管理を行う市場参加者数の増加が、市場を不安定化させる場合があることが分かった(図 41)。そして、取引する資本の数が増加すると、規制による不安定性が緩和されることを示した(図 42)。さらに、各エージェントの判断の高度化による計算負荷の増加や銘柄数の増大にする規模の増加に対しても、実際の制度検証や分析に適用可能な実行時間でのシミュレーションが可能となるように、経済市場シミュレーションの並列処理の効率性の向上を行うための機能の設計を行った。

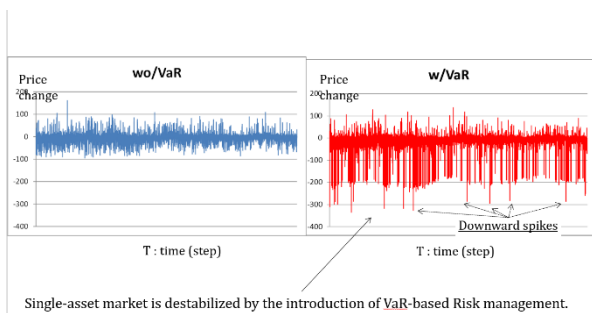
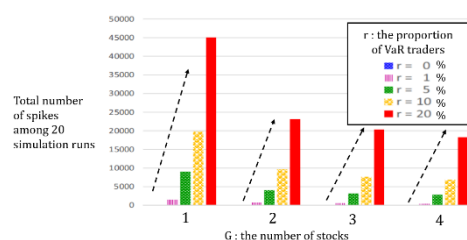


図 41 自己資本比率規制なし(左図)と規制あり(右図)のシミュレーションでの価格変動例



The multiple-asset market is destabilized along with the increase of the proportion of VaR traders.

図 42 規制を受けるエージェントの割合  $r$  および取引資本数  $G$  と市場の不安定性(縦軸)との関係

なお、以上の経済シミュレーションの研究では、本課題で開発した人工市場シミュレーション・ソフトウェア Plham を使用している。このソフトウェアは 2016 年 4 月より公開している (<https://github.com/plham/plham>)。既存の数値シミュレーションと異なりエージェントモデルによる実装なので、高速取引や自動取引などの現実の市場で見られる様々な投資戦略の混在環境を再現することができる。並列処理言語 X10 で実装されているので、シミュレーションの規模に合わせて、スタンドアローンの PC から大規模並列実行環境まで様々なスケールで実行可能である。ユーザは、研究者・技術者だけでなく、金融実務者や経済政策決定者を対象としており、利用者のために 2016 年度には 3 回の講習会を開催した。

## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 14 件、国際 (欧文) 誌 42 件)

1. 和泉 潔,余野 京登, 陳 ユ, 後藤 卓, 松井 藤五郎, 英文経済レポートのテキストマイニングと長期市場分析, ジャフイージャーナル 実証ファイナンスとクオンツ運用, pp.12-31, 朝倉書店, 2013 八木 勲, 水田 孝信, 和泉 潔, 人工市場を用いた市場暴落後における反発メカニズムの分析, 情報処理学会論文誌, 53 巻 11 号, pp. 2388-2398, 2012.<http://id.nii.ac.jp/1001/00087035/>
2. 藏本 貴久, 和泉 潔, 吉村 忍, 石田 智也, 中嶋 啓浩, 松井 藤五郎, 吉田 稔, 中川 裕志, 新聞記事のテキストマイニングによる長期市場動向の分析, 人工知能学会論文誌 Vol. 28(2013) No. 3 , p.291-296 (2013)
3. Toyotaro Suzumura and Hiroki Kanezashi, “A Holistic Architecture for Super Real-Time Multiagent Simulation Platform”, Proceedings of Winter Simulation Conference 2013, pp.1604-1612, 2013. (DOI: 10.1109/WSC.2013.6721543)
4. Toyotaro Suzumura and Hiroki Kanezashi, “Accelerating Large-Scale Distributed Traffic Simulation with Adaptive Synchronization Method”, Proceedings of the 20th ITS World Congress Tokyo 2013 . (CD-ROM)
5. Takayuki Osogami, Hideyuki Mizuta and Tsuyoshi Idé, “Identifying the optimal road closure with simulation”, Proceedings of the 20th ITS World Congress Tokyo 2013. (CD-ROM)
6. Chi Wang, Kiyoshi Izumi, Takanobu Mizuta, and Shinobu Yoshimura, “Investigating the Impact of Trading Frequencies of Market Makers: a Multi-agent Simulation Approach”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol.6 No.3 pp.216-220, 2013 (DOI: 10.9746/jmsi.6.216 )
7. Takanobu Mizuta, Satoshi Hayakawa, Kiyoshi Izumi and Shinobu Yoshimura, “Simulation Study on Effects of Tick Size Difference in Stock Markets Competition”, Proceedings of The 8th International Workshop on Agent-based Approach in Economic and Social Complex Systems (AESCS2013), pp.235-246, 2013.
8. Takanobu Mizuta, Kiyoshi Izumi, Isao Yagi, Shinobu Yoshimura, “Design of Financial Market Regulations against Large Price Fluctuations Using by Artificial Market Simulations”, Journal of Mathematical Finance, vol. 3 No. 2A, pp. 15-22, 2013 (DOI: 10.4236/jmf.2013.32A003)
9. Takayuki Osogami, Takashi Imamichi, Hideyuki Mizuta, Toyotaro Suzumura, and Tsuyoshi Idé, “Toward simulating entire cities with behavioral models of traffic”, IBM Journal of Research and Development, vol.57, no.5, pp.6:1-6:10, 2013. (DOI: 10.1147/JRD.2013.2264906)
10. Takanobu Mizuta, Kiyoshi Izumi, Shinobu Yoshimura, “Price Variation Limits and Financial Market Bubbles: Artificial Market Simulations with Agents’ Learning Process”, Proceedings of 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), 2013(DOI: 10.1109/CIFEr.2013.6611689)
11. Tetsuo IMAI and Atsushi TANAKA, “Analysis of discrete state space partitioned by the attractors of the dynamic network formation game model”, Proceedings 19th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems (AUTOMATA2013) - Exploratory Papers, pp.21-30, Giessen, Sep. 2013.
12. 水田秀行, 恐神貴行, 鈴木豊太郎, 井手剛, “大規模交通シミュレーターが支援する都市計画”, 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, vol.133, No.9, pp. 1632-1635, 2013. (DOI:10.1541/ieejieiss.133.1632)

13. Takayuki Osogami and Rudy Raymond, “Map Matching with Inverse Reinforcement Learning”, Proceedings of the 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 2547–2553, 2013. (ISBN: 978-1-57735-633-2)
14. 水田 孝信, 和泉 潔, 八木 勲, 吉村 忍, “人工市場を用いた値幅制限・空売り規制・アップティックルールの検証と最適な制度の設計”, 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), vol. 133, No. 9, pp. 1694–1700, 2013 (DOI: 10.1541/ieejieiss.133.1694)
15. 柴田 一樹, 和泉 潔, 磯崎 直樹, 吉村 忍, “閲覧行動タイプに基づいたウェブ広告配信シミュレーションモデル”, 電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌), vol. 133, No. 9, pp. 1762–1769, 2013 (10.1541/ieejieiss.133.1762)
16. Itsuki Noda, “Limitations of Simultaneous Multiagent Learning in Nonstationary Environments”, Prof. of 2013 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, pp. 309 – 314, IEEE, 2013 (DOI: 10.1109/WI-IAT.2013.125).
17. 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.
18. Koji Oishi, Takashi Shimada and Nobuyasu Ito, Group Formation through Indirect Reciprocity, Physical Review E vol. 87 030801(R) (2013)
19. Saki Kawakubo, Kiyoshi Izumi, and Shinobu Yoshimura, Analysis of an Option Market Dynamics Based on a Heterogeneous Agent Model, Intelligent Systems in Accounting Finance and Management, Volume 21, Issue 2, pages 105–128, 2014. (DOI: 10.1002/isaf.1353)
20. Wei Zhang, Olivier Tardieu, David Grove, Benjamin Herta, Tomio Kamada, Vijay Saraswat, Mikio Takeuchi, “GLB: Lifeline-based Global Load Balancing library in X10”, Proc. of the first Workshop on Parallel Programming for Analytics Applications (held during PPOPP '14), pp. 31–40, February 16, 2014 (DOI: 10.1145/2567634.2567639).
21. Takashi Shimada, “A universal transition in the robustness of evolving open systems,” Scientific Reports 4, 4082 (2014), DOI: 10.1038/srep04082.
22. Koji Oishi, Manuel Cebrian, Andres Abeliuk, Naoki Masuda. “Iterated crowdsourcing dilemma game,” Scientific Reports 4, 4100 (2014), DOI: 10.1038/srep04100.
23. Yohsuke Murase, Takeshi Uchitane, and Nobuyasu Ito, A tool for parameter-space exploration: Physics Procedia 57, p.73–76 (2014).
24. Yohsuke Murase, Janos Torok, Hang-Hyun Jo, Kimmo Kaski, and Janos Kertesz, “Multilayer weighted social network model,” Physical Review E, vol.90, 052810, 2014.
25. Saki Kawakubo, Kiyoshi Izumi, and Shinobu Yoshimura, How Does High Frequency Risk Hedge Activity Have an Affect on Underlying Market? : Analysis by Artificial Market Model, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.18, No.4 pp. 558–566, 2014.
26. Kumiko Maeda, Tetsuro Morimura, Takayuki Katsuki, and Masayoshi Teraguchi, “Frugal signal control using low resolution web-camera and traffic flow estimation”, In Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC'14), pp. 2082–2091, 2014. (DOI: 10.1109/WSC.2014.7020053)
27. 畑谷 卓哉, 熊谷 良夫, 鎌田 十三郎, “Web アプリケーション向け結合ビューライブラリにおける更新内容の即時反映機能とその実装”, 情報処理学会論文誌データベース(TOD), vol. 8, No. 2, pp. 68 – 77, 2015.
28. 草田裕紀, 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, “保有資産を考慮したマーケットメイク戦略が市場間競争に与える影響: 人工市場アプローチによる分析”, 人工知能学会論文誌, vol.

- 30 no. 5, pp. 675–682, 2015(10.1527/tjsai.30\_675)
29. Hideyuki Mizuta, "Evaluation of Metropolitan Traffic Flow with Agent-based Traffic Simulator and Approximated Vehicle Behavior Model Near Intersections", Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference (WSC'15), IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, pp. 3925–3936, 2015 (10.1109/WSC.2015.7408548).
  30. 草田裕紀,水田孝信,早川聡,和泉潔,"保有資産を考慮したマーケットメイク戦略が市場間競争に与える影響:人工市場アプローチによる分析",日本取引所ワーキングペーパー, Vol. 8, 2015年3月31日
  31. Takanobu Mizuta, Kiyoshi Izumi, Isao Yagi, and Shinobu Yoshimura, "Investigation of Price Variation Limits, Short Selling Regulation, and Uptick Rules and Their Optimal Design by Artificial Market Simulations", Electronics and Communications in Japan, volume 98, number 7, pages 13--21, 2015, DOI:10.1002/ecj.11684.
  32. Itsuki Noda, et. Al., "Roadmap for Multiagent Social Simulation on HPC", Proc. of DOCMAS-WEIN 2015, 2015.
  33. Takanobu Mizuta, Shintaro Kosugi, Takuya Kusumoto, Wataru Matsumoto, and Kiyoshi Izumi, "Effects of dark pools on financial markets' efficiency and price discovery function: An investigation by multi-agent simulations", Evolutionary and Institutional Economics Review, Volume 12, Issue 2, pp 375--394, 2015 DOI:10.1007/s40844-015-0020-3
  34. Itsuki Noda, Tomohisa Yamashita, "Pedestrian simulator with flexible framework to enhance detailed behavior and environmental change", Proc. of AROB 2016, pp. 510--515, 2016.
  35. Hidetoshi Kawaguchi, Itsuki Noda, "Possibility Assessment Framework of Data Assimilation Based on Pareto Efficiency for Multi-agent Social Simulation", Proc. of AROB 2016, pp.504--509., 2016.
  36. Takuya Okano, Itsuki Noda, "Investigation of Evolutionarily Adaptation of Exploration Rate in Multi-agent Reinforcement Learning", Proc. of AROB 2016, pp.190--195., 2016.
  37. 中島秀之,小柴等,佐野渉二,落合純一,白石陽,平田圭二,野田五十樹,松原仁: "Smart Access Vehicle System : フルデマンド型公共交通配車システムの実装と評価", 情報処理学会論文誌, vol.57, No.4, pp.1290--1302, 2016.
  38. 松島裕康, 内種岳詞, 辻順平, 山下倫央, 伊藤伸泰, 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, Vol.31, No.6, pp.AG-E\_1-9, 2016 (DOI: 10.1527/tjsai.AG-E).
  39. 山下倫央, 野田五十樹, 荻野光司, 高田和幸, 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, vol.31, No.6, pp.AG-I\_1-9, 2016 (DOI: 10.1527/tjsai.AG-I).
  40. Itsuki Noda, "Optimality and Equilibrium of Exploration Ratio for Multiagent Learning in Nonstationary Environments", Multi-Agent Based Simulation XVIVol. 9568, pp. 159--172, 2016 (10.1007/978-3-319-31447-1\_11).
  41. Kento Yamashita, Tomio Kamada, "Introducing a Multithread and Multistage Mechanism for the Global Load Balancing Library of X10", Journal of Information Processing, Vol. 24, No. 2, pp. 416-424, March, 2016. (DOI: 10.2197/ipsjip.24.416)
  42. Daisuke Fujishima, Tomio Kamada: "Redistribution Mechanism for Associative Distributed Collections of Objects", 15th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2016), Okayama, Japan, pp. 583-588, June, 2016. (DOI: DOI: 10.1109/ICIS.2016.7550821)
  43. Daisuke Fujishima, Tomio Kamada, "Collective Relocation for Associative Distributed Collections of Objects", International Journal of Software Innovation (IJSI)5(2), pages

- 15, 2017. (DOI: 10.4018/IJSI.2017040104)
44. Takuma Torii, Tomio Kamada, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, "Platform design for large-scale artificial market simulation and preliminary evaluation on the K computer", *Artificial Life and Robotics*, Volume 22, Issue 3, pp 301-307, September 2017 (DOI: 10.1007/s10015-017-0368-z) (to appear).
  45. Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, "Shock transfer by arbitrage trading: analysis using multi-asset artificial market", *Evolutionary and Institutional Economics Review*, volume 12, number 2, pages 395--412, 2016, DOI:10.1007/s40844-015-0024-z
  46. Takanobu Mizuta, Shintaro Kosugi, Takuya Kusumoto, Wataru Matsumoto, Kiyoshi Izumi, Isao Yagi, and Shinobu Yoshimura, "Effects of Price Regulations and Dark Pools on Financial Market Stability: An Investigation by Multiagent Simulations", *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, Volume 23, Issue 1-2, pages 97-120, January-June 2016, DOI: 10.1002/isaf.1374
  47. Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, "Shock transfer by arbitrage trading: analysis using multi-asset artificial market", *Evolutionary and Institutional Economics Review*, volume 12, number 2, pages 395--412, 2016, DOI:10.1007/s40844-015-0024-z
  48. N. Yoshioka, T. Shimada, and N. Ito, "Macroscopic fundamental diagram in simple model of urban traffic," *Artificial Life and Robotics*, DOI: 10.1007/s10015-016-0345-y (2016).
  49. 内種岳詞, 伊藤伸泰「因子分析による都市規模自動車交通シミュレーション結果の解釈」計測自動制御学会論文集, Vol 52, No 10, pp. 545-554(2016)
  50. 服部宏充, 十見俊輔, 中島悠, "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", *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J100-D, No.2, pp. 180-193, 2017 (DOI: 10.14923/transinfj.2016JDP7062).
  51. F. Ogushi, J. Kertesz, K. Kaski, and T. Shimada "Enhanced robustness of evolving open systems by the bidirectionality of interactions between elements," *Scientific Reports* Vol. 7, 6978 (2017).
  52. M. Masuko, T. Hiraoka, N. Ito, and T. Shimada, "The effect of laziness in group chase and escape," *Journal of Physical Society of Japan* Vol. 86, 085002 (2017).
  53. T. Hiraoka, T. Shimada, and N. Ito, "Order-disorder transition in repulsive self-propelled particle systems," *Physical Review E* Vol 94, 062612 (2017).
  54. S. Nagumo, T. Shimada, N. Yoshioka, and N. Ito, "The Effect of Tick Size on Trading Volume Share in Two Competing Stock Markets," *Journal of Physical Society of Japan* Vol 86, 014801 (2017).
  55. Y. Murase, T. Uchitane and N. Ito, "An open-source job management framework for parameter-space exploration: OACIS," *Proceedings of the 30th Annual Workshop "Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics"* (The University of Georgia, Athens, U.S.A., February 20-24, 2017)
  56. Hideyuki Mizuta, "Large-Scale Distributed Agent-based Simulation for Shopping Mall and Performance Improvement with Shadow Agent Projection", *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC'17)*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA. pp. 1157-1168. doi: 10.1109/WSC.2017.8247863

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. T. Osogami, T. Imamichi, H. Mizuta, T. Morimura, R. Raymond, T. Suzumura, R. Takahashi, and T. Ide, "IBM Mega Traffic Simulator," *IBM Research Report*, RT0947, December 2012.

2. 川久保 佐記, 和泉 潔, 「第10章 金融市場分野における危機管理」in 板生 清 監修, 「危機管理方法論とその応用」, シーエムシー出版, pp. 197-214, 2013.
3. 水田 孝信・早川 聡・和泉 潔・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, 2013. <http://www.tse.or.jp/about/seisaku/wp/index.html>
4. 宮崎 文吾, 和泉 潔, 鳥海 不二夫, 高橋 諒, 混合ガウスモデルを用いた市場注文状況の変化の検出, JPX ワーキングペーパー, vol. 3, 2013.
5. 草田裕紀, 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, 吉村忍, ”人工市場シミュレーションを用いたマーケットメイカーの спреッドが市場出来高に与える影響の分析”, 日本取引所ワーキングペーパー vol.5, 2013.
6. 水田秀行, 牟田英正, 今道貴司, “都市計画のための交通シミュレーション〜スマートな都市運営のためのデータ解析とWhat-ifシミュレーション”, 情報処理学会会誌 55巻6号, pp. 579-584, 2014.
7. 和泉 潔, ビッグデータとエージェントシミュレーション, 情報処理, Vol. 55, No. 6, pp. 549-556, 2014
8. 草田裕紀, 水田孝信, 早川聡, 和泉潔, 保有資産を考慮したマーケットメイク戦略が市場間競争に与える影響: 人工市場アプローチによる分析, 日本取引所ワーキングペーパー, Vol. 8, 2015.
9. 水田孝信, 則武誉人, 早川聡, 和泉潔, 人工市場シミュレーションを用いた取引システムの高速度化が価格形成に与える影響の分析, 日本取引所ワーキングペーパー, Vol. 9, 2015.
10. Hiroki Murata, Hideyuki Mizuta, Toyotaro Suzumura, Mikio Takeuchi, Kiyokuni Kawachiya, “Cloud Enablement of an X10-Based Distributed Simulation Framework,” IBM Research Report, RT0971, 2016.
11. 野田五十樹: “エージェント技術とその応用”, 人工知能, Vol.31, No.6, pp.931. 2016.
12. 和泉 潔, 斎藤 正也, 山田 健太, マルチエージェントのためのデータ解析, コロナ社, 2017
13. 和泉 潔, 川久保 佐記, 米納 弘渡, 「第5章 強靱な金融システム」, 古田 一雄 編著, レジリエンス工学入門, 日科技連, 2017

### (3) 国際学会発表及び主要な国内学会発表

#### ① 招待講演 (国内会議 15 件、国際会議 22 件)

1. 松尾 琢己, 大墳 剛士, 水田 孝信, 宮崎 文吾, “日本取引所グループの研究活動への取り組み”, 第10回 人工知能学会 ファイナンスにおける人工知能応用研究会, 東京, 2013年3月19日.
2. Nobuyasu Ito, “Society-in-silico with exascale computer”, 2013 NCTS April Workshop on Critical Phenomena and Complex Systems(Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, April 15-16, 2013).
3. Toyotaro Suzumura, “Big Data Processing in Large-Scale Graph Analytics and Billion-Scale Social Simulation”, The NSF workshop on Big Data and Extreme-scale Computing (BDEC), South Carolina, US, 2013年4月30日.
4. 伊藤伸泰「次世代スーパーコンピュータによる社会シミュレーションの展望」2013年度人工知能学会全国大会(第27回)(富山国際会議場、2013 June 4-7)
5. 島田尚「開放進化系における新しい多様化転移について」2013年度第1回複雑コミュニケーションサイエンス研究会 2013年6月4日(立命館大学びわこ・くさつキャンパス)
6. 鈴木 豊太郎, “ビッグデータ解析を支える基盤技術”, 人工知能学会全国大会 JSAI2013 OS 招待講演, 富山, 2013年6月5日.
7. Nobuyasu Ito, “Society-in-silico”, VIIth Brazilian Meeting of Simulation



- Physics(Joao Pessoa, Brazil, August 5-10, 2013).
8. 伊藤伸泰、稲岡創、今井哲郎、内種岳詞、村瀬洋介、藤井秀樹「ネットワーク交通のシミュレーション」第19回交通流のシミュレーションシンポジウム(名古屋大学、2013年12月16-17日)
  9. Takashi Shimada, "Collective motion in sand-swimming and a stock market," 2014 Mini Workshop on Networks and Society (Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Republic of China, February 17, 2014).
  10. Itsuki Noda, "Project CASSIA --- Challenge for Exhaustive Multiagent Social Simulation ---", Japan Extreme Big Data Projects Workshop, Fukuoka, 2014/2/26.
  11. 水田 秀行, 鈴村 豊太郎, "大規模エージェント実行基盤を用いた都市交通シミュレーション", 計測自動制御学会第一回制御部門マルチシンポジウム OS 招待講演, 東京, 2014年3月7日.
  12. 水田 秀行, "スマートな都市構築のための IBM の取り組み~データ解析と都市交通シミュレーション~", 同志社大学 ITEC セミナー, 京都, 2014年6月6日.
  13. Nobuyasu Ito, "Simulation study of liquid-gas transition," International Conference "Smart functional materials for shaping our future," (Debrecen, Hungary, 19-20 September 2014)
  14. Nobuyasu Ito, "Simulation of society with supercomputers - from molecules to people, " 韓国計算科学会秋期研究会 (延世大学、2014年10月21日(火)、ソウル、韓国)
  15. Takashi Shimada, "An "Ising model" of evolving open systems"(2015年1月29日、浦項、韓国)
  16. Nobuyasu Ito, "Network traffic simulation", VIIIth Brazilian Meeting on Simulational Physics (Florianopolis, Brazil, August 4-7th, 2015)
  17. Nobuyasu Ito, "Social simulation with supercomputers", 2015 NCTS International Workshop on Critical Phenomena and Complex Systems ( August 15 - 17, 2015, Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan).
  18. 水田 秀行, "スマートな社会システムのための大規模交通シミュレーション", 計測自動制御学会第9回社会システム部会研究会特別講演, 神奈川, 2015年8月28日.
  19. 野田五十樹 社会シミュレーション用人工知能, Software Japan 2016, 一橋大学, 2016/2/4.
  20. \* Itsuki Noda, Multiagent Simulation for Designing Social Services, WEIN-16 / AAMAS 2016, Singapore, 2016/5/10.
  21. Yohsuke Murase, Universality in Open-Evolving Systems, The 3rd International Workshop on Physics of Social Complexity: Self-Organization and Robustness of Evolving Many-Body Systems, Pohang University of Science and Technology, 2016/5/27.
  22. Yohsuke Murase, Multilayer Weighted Social Network Model, Social Connectome, satellite meeting of NetSci2016, The K-Hotel, Seoul, Korea, 2016/5/30.
  23. Takashi Shimada, Group formation through indirect reciprocity with personal opinion, NetSci2016 satellite "Social Connectome" 招待講演, The K-Hotel Seoul (韓国), 2016/5/30.
  24. 和泉 潔, 水田孝信, 人工市場シミュレーションによる制度変更とシステムリスクの分析, 日銀・金融研究所セミナー, 東京、2016年6月21日
  25. Nobuyasu Ito, "Social simulations on the Post-K computer," 東京大学 (Asia-Pacific Econophysics Conference 2016 - Big Data Analysis and Modeling toward Super Smart Society - ) 2016年8月31日

26. \* Itsuki Noda, Multiagent Simulation for Designing Social Services, KES 2016, York, England, 2016/9/6.
27. 和泉 潔, 金融市場における人工知能技術の応用, 神戸大学六甲フォーラム, 神戸, 2016年9月20日
28. Itsuki Noda, Possibilities of Exhaustive Multiagent Social Simulation, IEEE-ICA 2016, Matsue, Japan, 2016/9/29.
29. Takashi Shimada, A complexity-robustness relation in evolving open systems, Interdisciplinary Applications of Nonlinear Science, 鹿児島大学, 2016/11/6.
30. Takashi Shimada, Critical and non-critical behaviors in evolving systems, A mini-workshop on complexity theory and its applications, 上海理工大学, 2016/11/12.
31. Yohsuke Murase, A software framework for comprehensive simulations and its application to social network modeling, Mini-workshop on Complex Systems and Networks, AIMR Tohoku University, 2016/11/25.
32. \* Nobuyasu Ito, "Social simulation with exascale computer," Leipzig University, Germany (17th International Workshop on Computational Physics/NTZ-DFH/UFA Colloquium) 2016年11月29日
33. 和泉 潔, 人工知能(AI)を活用した資産運用支援の可能性と課題, 行動経済学会第10回大会, 東京, 2016年12月4日
34. Kiyoshi Izumi, "Artificial Market Simulation of Flash Crash and Systemic Risk", The Singapore-ETH Centre Resilience Engineering Research Centre Workshop, Singapore, 2016年12月8日
35. 伊藤伸泰「From molecules to human, from substance to society: A HPC challenge」自然科学研究機構(Supercomputer Workshop 2016「これまでの理論・計算科学を振り返り今後を展望する」) 2017年2月2日
36. 和泉 潔, 人工知能技術の金融市場分析への活用の現状, 第46回 2016年度冬季JAFEE大会, 東京, 2017年2月17日・18日
37. 和泉 潔, 人工知能技術の金融市場分析への応用可能性, 大和証券グループ・東京大学 未来金融フォーラム オープニングシンポジウム, 東京, 2017年3月21日

② 口頭発表 (国内会議 77 件、国際会議 35 件)

1. Takashi Shimada, Diversifying Transition in a Simple Model of Eco- (socio-, whatever-) systems, (Novel Development in Statistical Physics, 東大小柴ホール, 2012年12月4日)
2. Koji Oishi, Takashi Shimada and Nobuyasu Ito, Group Formation through Indirect Reciprocity, 26th annual workshop "Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics" (University of Georgia, U.S.A., 2013年2月27日).
3. Nobuyasu Ito, Society-in-silico engine with exascale computer, 26th annual workshop "Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics" (University of Georgia, U.S.A., 2013年3月1日)
4. 野田五十樹、「網羅的社会シミュレーションの可能性」、FUN-AI 2013、大沼、2013年3月27日。
5. 十見俊輔(京大)・服部宏充(京大)、マルチエージェントシミュレーションに基づいた電力消費におけるマイクロマクロリンク分析に関する一考察、情報処理学会第75回全国大会、5S-6, pp. 401-402, 仙台市、2013年3月8日
6. 川久保 佐記, 和泉 潔, 吉村 忍, "原資産市場オプション市場の相互作用を考慮したマルチエージェントシミュレーションモデルの構築", 第10回ファイナンスにお

- ける人工知能応用研究会, 東京, 2013年3月19日
7. Takanobu MIZUTA, Kiyoshi IZUMI, Shinobu YOSHIMURA, "Price Variation Limits and Financial Market Bubbles: Artificial Market Simulations with Agents' Learning Process", 2013 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Singapore, 2013年4月16日
  8. Nobuyasu Ito, "Society-in-Silico for Safety and Security with EXA-SCALE COMPUTER", WORKSHOP for CENTRE OF EXCELLENCE COMPUTATIONAL SOCIAL SCIENCE and ENGINEERING APPLICATIONS (Biopolis, Singapore, 25-26 April, 2013).
  9. 伊藤伸泰「エクサスケール計算機による Society-in-silico」ワークショップ「スーパーコンピュータによる社会シミュレーションとその将来」(理化学研究所計算科学研究機構、2013年5月13日)
  10. 内種岳詞, 村瀬洋介, 伊藤伸泰, "OACIS による進化計算の実行管理", 第6回進化計算学会研究会
  11. 島田尚「生態/社会系における 普遍性の探求」2013年度人工知能学会全国大会(第27回)(富山国際会議場、2013 June 4-7)
  12. 水田 孝信, 和泉 潔, 八木 勲, 吉村 忍, "人工市場を用いた大規模誤発注が価格変動に与える影響の分析", 2013年度人工知能学会全国大会(第27回), 富山, 2013年6月7日.
  13. 川久保 佐記, 和泉 潔, 吉村 忍, "市場間連成を考慮した人工市場によるリスクヘッジ行動の影響分析", 2013年度人工知能学会全国大会(第27回), 富山, 2013年6月7日.
  14. 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, "実験計画法に基づくパラメータ探索を用いた大規模マルチエージェントシミュレーションの分析", 2013年度人工知能学会全国大会, 富山, 2013/06/07.
  15. Nobuyasu Ito, "CASSIA manager, a management framework for social simulations", The second joint workshop on computational social science and engineering for urban sustainability(RIKEN AICS, Kobe, Japan, July 29-30, 2013).
  16. 村瀬洋介「シミュレーション実行管理ソフトウェア "CASSIA Manager" ("CASSIA Manager", a software for management of simulation results)」平成25年度第3回京物性セミナー(2013/7)
  17. 水田 孝信, 早川 聡, 和泉 潔, 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", 第39回ジャフィー大会(2013年度夏季), 東京, 2013年8月5日.
  18. 川久保 佐記, 和泉 潔, 吉村 忍, "人工市場を用いたデルタヘッジ取引の原資産市場への影響分析", 第39回ジャフィー大会(2013年度夏季), 東京, 2013年8月5日.
  19. Nobuyasu Ito, "A model of human community", 5th Hungary-Japan Bilateral Workshop on Statistical Physics of Breakdown Phenomena(Debrecen, Hungary, September 9-12, 2013)
  20. Takanobu Mizuta, Satoshi Hayakawa, Kiyoshi Izumi and Shinobu Yoshimura, "Simulation Study on Effects of Tick Size Difference in Stock Markets Competition", The 8th International Workshop on Agent-based Approach in Economic and Social Complex Systems (AESCS2013), Tokyo, JAPAN, 2013年9月13日.
  21. Saki Kawakubo, Kiyoshi Izumi, Shinobu Yoshimura, "Impact of delta hedging on underlying market: Multi-agent model approach", 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2013 (JAWS2013), 和歌山, 2013年9月17-20日
  22. 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰「高密度群衆におけるパニックの効果」日本物理学

- 会 2013 年秋季大会(徳島大学、2013 年9月 25-28 日)
23. 叶小舟、和泉潔, “価格単位と高頻度取引が取引戦略の収益に及ぼす影響の分析”, 第 11 回金融情報学研究会(SIG-FIN), 東京, 2013 年 10 月 12 日
  24. 水田孝信、和泉潔、八木勲、吉村忍, “人工市場を用いた大規模誤発注による市場混乱を防ぐ制度・規制の検証 ～ トリガー式アップティック・ルールを中心に ～”, 第 11 回金融情報学研究会(SIG-FIN), 東京, 2013 年 10 月 12 日
  25. Olivier Tardieu, David Grove, Benjamin Herta, Tomio Kamada, Vijay Saraswat, Mikio Takeuchi, Wei Zhang, “X10 for Productivity and Performance at Scale”, SC13, The HPC Challenge Award BoF, Class 2 Award finalist, Nov. 2013.
  26. Nobuyasu Ito, “From people to society, a supercomputer challenge”, The 4th AICS International Symposium(RIKEN AICS, Kobe, Japan, December 2-3, 2013)
  27. 伊藤伸泰「流れ2題」 鳥取非線形研究会 2013(鳥取大学工学部、December 8-9, 2013)
  28. 村瀬洋介 「OACIS – Organizing Assistant for Comprehensive and Interactive Simulations」第4回 CASSIA Workshop (2013/12)
  29. Takeshi Uchitane, Taro Fukutomi, Toshiharu Hatanaka, Atsushi Yagi, “A study on Stochastic Animal Swarm Optimization with gradient estimation methods”, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2013.
  30. Nobuyasu Ito, “From Ising model toward steam engine”, Hans J. Herrmann’s 60th Anniversary International Conference on “Dynamic Systems” (ETH Zurich, Switzerland, January 10, 2014)
  31. Takashi Shimada, “A universal transition in robustness of evolving open systems,” , Hans J. Herrmann’s 60th Anniversary International Conference on “Dynamic Systems” (ETH Zurich, Switzerland, January 10, 2014)
  32. 水田孝信, 小杉 信太郎, 楠本 拓矢, 松本 渉, 和泉潔, 吉村忍, “ダーク・プールは金融市場を安定化しマーケット・インパクトを低減させるか? ～人工市場シミュレーションを用いた検証～”, 第 40 回ジャファイー大会, 東京, 2014 年 1 月 10 日
  33. Yohsuke Murase, Takeshi Uchitane and Nobuyasu Ito, “A tool for parameter-space explorations”, 27th Workshop “Recent Developments in Computer Simulation Studies in Condensed Matter Physics” (The University of Georgia, Athens, U.S.A., February 24-28, 2014)
  34. 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, “網羅的シミュレーションにおける実験計画法を応用した計画モジュールの開発”, 情報処理学会全国大会, 東京, 2014/3/12.
  35. Takanobu Mizuta, Kiyoshi Izumi, Isao Yagi and Shinobu Yoshimura, ” Regulations’ Effectiveness for Market Turbulence by Large Mistaken Orders using Multi-Agent Simulation”, IEEE Computational Intelligence for Financial Engineering and Economics 2014, London, 2014 年 3 月 27 日.
  36. Takanobu Mizuta, Shintaro Kosugi, Takuya Kusumoto, Wataru Matsumoto and Kiyoshi Izumi, ”Do Dark Pools Stabilize Markets and Reduce Market Impacts? – Investigations using Multi-Agent Simulations -“, IEEE Computational Intelligence for Financial Engineering and Economics 2014, London, 2014 年 3 月 27 日.
  37. 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰「目的地を持たない歩行者の高密度によける集団運動」 2014 年日本物理学会第 69 回年次大会(東海大学湘南キャンパス、2014 March 27-30)
  38. 宮地将大, 小柴等, 野田五十樹 , “網羅的シミュレーションを用いた交通システムの評価手法の検討”, 人工知能学会全国大会予稿集, pp. 4N1-4, 人工知能学会, 5 月, 2014 年 5 月 14 日.
  39. 泉野桂一朗, 山下倫央, 野田五十樹 , “時間的制御を組み込んだ歩行者移動のシミュレーションによる効率評価”, 人工知能学会全国大会予稿集, pp. 4N1-1, 人

- 工知能学会, 2014年5月14日.
40. 草田 裕紀、水田 孝信、早川 聡、和泉 潔、吉村 忍、人工市場を用いたマーケットメーカーのスプレッドが市場出来高に与える影響の分析、2014年度人工知能学会全国大会、松山、2014年5月14日
  41. 川久保 佐記、和泉 潔、オプション市場の人工市場モデルによるオプション取引の原資産市場への影響分析、第41回ジャフィー大会、東京、2014年8月2日
  42. 浅野優太、伊藤伸泰、稲岡創、村瀬洋介、今井哲郎、内種岳詞、藤井秀樹「知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES を用いた神戸市の都市交通シミュレーション」日本物理学会 2014年秋季大会（中部大学春日井キャンパス、2014年9月7-10日）
  43. 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰「2次元時刻どう粒子系の秩序化ダイナミクス」日本物理学会 2014年秋季大会（中部大学春日井キャンパス、2014年9月7-10日）
  44. 八木 勲、水田孝信、和泉潔、空売りが活発な市場における金融ショック伝播分析、第13回人工知能学金融情報学研究会(SIG-FIN)、東京、2014年10月11日
  45. Yuki Kusada, Tkanohbu Mizuta, S. Hakawa, Kiyoshi Izumi, Impacts of Position-Based Market Makers on Markets' Shares of Trading Volumes - An Artificial Market Approach, Social Modeling and Simulations + Econophysics Colloquium 2014, Kobe, 2014年11月5日.
  46. Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, Multi-Asset Artificial Market Simulation: Test of Market-wide Circuit Breaker Regulation, Social Modeling and Simulations + Econophysics Colloquium 2014, Kobe, 2014年11月5日.
  47. Itsuki Noda, "Project CASSIA: Framework for Administration of Social Simulations on Massively Parallel Computers", Proc. of ATIP workshop 2014 in SC14, Nov., 2014年11月17日
  48. 宮崎 文吾、和泉 潔、山田 健太、確率的板モデルを用いた株式市場の統計性の分析、人工知能学会合同研究会 2014 第7回 データ指向構成マイニングとシミュレーション研究会、2014年11月21日
  49. Kiyoshi Izumi, Whole Tokyo Stock Exchange Market Simulation Project: Design of Financial Market Regulations using Agent-based Simulation, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software, 2014年12月3日
  50. 内種岳詞、村瀬洋介、伊藤伸泰「OACIS: 大規模問題における進化計算の実行管理」(資料集, pp. 761, 2014) 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
  51. 内種岳詞、伊藤伸泰「交通シミュレーションによる交通解析」第21回社会におけるAI研究会
  52. 内種岳詞、村瀬洋介、伊藤伸泰「OACISによる進化計算の実行管理」(資料集, pp. 150-151, 2014) 第6回進化計算学会研究会
  53. 宮崎文吾、和泉潔、山田健太、スプレッドに着目した確率的板モデルによる株価変動のハースト指数の再現、第14回人工知能学会 金融情報学研究会(SIG-FIN)、東京、2015年1月21日
  54. 水田孝信、小杉信太郎、楠本拓矢、松本渉、和泉潔、人工市場シミュレーションを用いたダーク・プールによる市場効率化の分析、第42回 2014年度冬季JAFEE大会、東京、2015年1月23日
  55. Hideyuki Mizuta, Hiroki Murata, Kumiko Maeda, Toyotaro Suzumura, "City Traffic Simulation on the Large-scale Agent Simulation Framework", X10 Day Tokyo 2015, Tokyo, 2015年1月29日.
  56. Tomio Kamada, "Current Status of X10 on K Computer", X10 Day Tokyo, Jan.

- 2015.
57. 野田五十樹, "気まぐれのススメ", FUN-AI 2015, 函館, 2月28日, 2015.
  58. 野田五十樹, "探索率の最適性と均衡性に関する検討", 社会システムと情報技術研究ウィーク, 3月4日, 2015.
  59. 川口英俊, 野田五十樹, "人流シミュレーションにおける複数の評価基準を考慮したOD表の推定", 社会システムと情報技術研究ウィーク, 3月3日, 2015.
  60. 泉野桂一朗, 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, "大規模群集に対する各種移動制約導入手法のシミュレーションによる評価", 社会システムと情報技術研究ウィーク, 3月3日, 2015.
  61. 辻順平, 山下倫央, 野田五十樹, "災害避難シミュレーションの実証展示に関する事例報告", 社会システムと情報技術研究ウィーク, 3月2日, 2015.
  62. 岡野拓哉, 野田五十樹, "様々な exploration 率を持ったマルチエージェント強化学習の考察", 社会システムと情報技術研究ウィーク, 3月4日, 2015.
  63. 吉岡直樹, 伊藤伸泰 「単純化した都市交通のモデルのシミュレーション」 2015年日本物理学会第70回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月21-24日)。
  64. 南雲将太, 島田尚, 伊藤伸泰「取引市場におけるティックサイズと取引高シェアの関係性に関する数理的解析」2015年日本物理学会第70回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月21-24日)。
  65. 村瀬洋介, Hang-Hyun Jo, Kimmo Kaski, Janos Kertesz 「複数レイヤー社会ネットワークモデル」 2015年日本物理学会第70回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年)
  66. 伊藤伸泰, Hang-Hyun Jo, Kimmo Kaski, Janos Kertesz, 村瀬洋介 「移動と人間関係」 2015年日本物理学会第70回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月21-24日)。
  67. Shih-Chieh Wang, 伊藤伸泰, 浅野優太 「A translocation-agent-based epidemic model」 2015年日本物理学会第70回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス, 2015年3月21-24日)。
  68. 樋口彰(京都大)・服部宏充(立命館大)、プローブカーデータに基づいた京都市観光者の観光行動分析、2014年度人工知能学会全国大会(第28回)、松山市、2014年5月12日
  69. 金月寛彰(京都大)・服部宏充(立命館大)、プローブカーデータを利用したタクシードライバーの個人特性の分析とモデル化、2015年度人工知能学会全国大会(第29回)、函館市、2015年5月30日
  70. 鳥居拓馬, 中川勇樹, 和泉潔, 複数資産人工市場を用いた裁定取引によるショック伝搬の分析, 2015年度人工知能学会全国大会(第29回), 函館, 2015年5月30日-6月2日.
  71. 野田 五十樹, Exploration 率の進化計算的改善の可能性について, 第29回人工知能学会全国大会, はこだて未来大学, 2015.05.30.
  72. 川口英俊, 野田五十樹, 人流シミュレーションにおける複数の評価基準を考慮した時間別 OD 表の推定, 第29回人工知能学会全国大会, はこだて未来大学, 2015.05.30.
  73. 岡野拓哉, 野田五十樹, exploration 率の共有範囲によるマルチエージェント強化学習の考察, 第29回人工知能学会全国大会, はこだて未来大学, 2015.05.30.
  74. 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, 実験計画法に基づくパラメータ探索を用いた大規模マルチエージェントシミュレーションの分析, 第29回人工知能学会全国大会, はこだて未来大学, 2015.05.30.
  75. Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, Shock transfer by arbitrage trading and the role of circuit breakers, The 21st International Conference on Computing in

- Economics and Finance 2015 (CEF2015), Taipei, Taiwan, June 20–22, 2015.
76. 山下 憲人, 鎌田 十三郎, “分散環境向け動的負荷分散ライブラリへのマルチスレッド機構の導入とマルチスレッド対応実装”, 2015 年並列/分散/協調処理に関する『別府』サマー・ワークショップ (SWoPP2015), Aug. 2015.
  77. 村田 浩樹, 水田 秀行, 鈴木 豊太郎, 竹内 幹雄, 河内谷 清久仁, “X10 を用いた分散エージェントシミュレーション基盤サービス”, 日本ソフトウェア科学会第 32 回大会, 東京, 2015 年 9 月 9 日.
  78. 水田孝信, 則武誉人, 早川聡, 和泉潔, 人工市場シミュレーションを用いた取引システムの高速度が価格形成に与える影響の分析, 第 15 回 人工知能学会 金融情報学研究会 (SIG-FIN), 東京, 2015 年 9 月 26 日.
  79. 池田圭佑, 岡田佳之, 鳥海不二夫, 榊剛史, 風間一洋, 野田五十樹, 諏訪博彦, 篠田孝祐, 栗原聡, 情報拡散とユーザーの地域情報の関連性, Joing Agent Workshop & Symposium 2015, 石川県山中温泉, 2015.09.30.
  80. 川口英俊, 野田五十樹, マルチエージェント社会シミュレーションにおけるデータ同化の可能性評価, Joing Agent Workshop & Symposium 2015, 石川県山中温泉, 2015.09.30.
  81. Hideyuki Mizuta, “Agent-based Simulation of movement and purchasing behavior of walking shoppers”, AROB 21st 2016, B-Con PLAZA, Beppu. JAPAN, Jan. 20–22, 2016.
  82. 水田孝信, 小杉信太郎, 楠本拓矢, 松本渉, 和泉潔, ダーク・プールが市場効率性と価格発見メカニズムに与える影響 ~人工市場モデルと数式モデルを用いたメカニズムの分析~, 第 44 回ジャフィー大会, 東京, 2016 年 1 月 14 日
  83. 野田五十樹, 川口義英, 社会シミュレーションの同化可能性, FUN-AI 2016, 北海道・大沼, 2016.02.26.
  84. 松島裕康, 藤井秀樹, 山下倫央, 野田五十樹, バス輸送実施計画へ向けた交通シミュレーションによる取り組み, 社会システムと情報技術研究ウイーク 2016, 北海道・留寿都, 2016.03.03.
  85. 川口英俊, 野田五十樹, マルチエージェント社会シミュレーションにおけるデータ同化の可能性評価の枠組み, 情報処理学会第 78 回全国大会, 慶應義塾大学, 2016.03.11.
  86. 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, 網羅的シミュレーションにおける実験計画法を応用した計画モジュールの開発, 情報処理学会第 78 回全国大会, 慶應義塾大学, 2016.03.11
  87. 西岡 伸, 鳥居 拓馬, 和泉 潔, マーケットメーカーとダーク・プールの相互作用が市場の効率性に与える影響: 人工市場アプローチによる分析, 第 16 回人工知能学会金融情報学研究会, 東京, 2016 年 3 月 28 日
  88. 水田 孝信, 小杉 信太郎, 楠本 拓矢, 松本 渉, 和泉 潔, ダーク・プールが市場効率性と価格発見メカニズムに与える影響 ~人工市場モデルと数式モデルを用いたメカニズムの分析~, 第 16 回人工知能学会金融情報学研究会, 東京, 2016 年 3 月 28 日
  89. 落合純一, 金森亮, 松島裕康, 野田五十樹, 中島秀之, タクシー配車データを用いたリアルタイムデマンド交通システムの実用性評価, 第 53 回土木計画学研究発表会, 札幌, 2016/5/28.
  90. 内種岳詞「大規模社会シミュレーションの実践—シミュレーション実行管理フレームワークと実験計画—」日本 OR 学会「数理的発想とその実践」研究部会 第 7 回研究集会 2016 年 7 月 16 日
  91. Nobuyasu Ito, “Social simulations on the Post-K computer,” 茨城県神栖市(The 1st Workshop on Self-Organization and Robustness of Evolving Many-Body Systems) 2016 年 8 月 27 日

92. Yohsuke Murase, “What does Big Data tell? Sampling the social network by communication channels,” 茨城県神栖市(The 1st Workshop on Self-Organization and Robustness of Evolving Many-Body Systems) 2016 年 8 月 28 日
93. 内種岳詞,伊藤伸泰「道路ネットワーク構造と OD 分布が都市自動車交通に与える影響考察」平成 28 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 2016 年 8 月 31 日
94. 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰「斥力相互作用する自己駆動粒子系の転移」日本物理学会第 71 回年次大会(2016 年)・秋季 2016 年 9 月
95. 村瀬洋介「社会ネットワークにおける通信チャンネルによるサンプリングの影響」日本物理学会第 71 回年次大会(2016 年)・秋季 2016 年 9 月
96. 米納 弘渡,和泉 潔, バーゼル規制による複数資産連続ダブルオークション市場への不安定化効果, 第 26 インテリジェント・システム・シンポジウム,大阪,2016 年 10 月 27 日
97. 水田秀行, “大規模商業施設における歩行者購買活動シミュレーション”, 第 26 インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN2016), 大阪, 2016 年 10 月 27-28 日.
98. Hiroto Yonenoh, Kiyoshi Izumi, “Destabilization effect of risk management with VaR on a multiple asset continuous double auction market”, Duke Forest Conference 2016 (DFC2016), Hilton Garden Inn Durham Southpoint, Durham, North Carolina, US, 13 Nov 2016
99. Takuma Torii, Tomio Kamada, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada, ” Platform Design for Large-Scale Artificial Market Simulation and Preliminary Evaluation on the K computer”, AROB 22nd 2017 , B-Con PLAZA, Beppu. JAPAN ,Jan. 19-21, 2017
100. Daisuke Fujishima, Tomio Kamada, Takumi Torii, Kiyoshi Izumi: “Overlapping Communication and Computation for Large-Scale Artificial Market Simulation”, Proc. of 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2017), pp. 708-713, Beppu, Japan, Jan. 2017
101. Hideyuki Mizuta, “Introduction of Open Source Social Simulation Framework “X10-based Agent Simulation on Distributed Infrastructure (XASDI)” - From multi-node message transfer experiments to large-scale shopping mall simulation -”, AROB 22nd 2017 , B-Con PLAZA, Beppu. JAPAN ,Jan. 19-21, 2017.
102. 水田孝信, 和泉潔,人工市場シミュレーションを用いたバッチオークションの分析, 第 46 回 2016 年度冬季 JAFEE 大会, 東京,2017 年 2 月 17 日・18 日
103. Yohsuke Murase, “OACIS: An open-source job management framework for parameter-space exploration,” The University of Georgia(The 30th Annual CSP workshop) 2017 年 2 月 21 日
104. Nobuyasu Ito, “Roadmap of social simulation with Exascale computer and beyond,” The University of Georgia(The 30th Annual CSP workshop) 2017 年 2 月 21 日
105. 和泉潔, 米納弘渡, リスク管理が市場リスクをもたらすか:高頻度・大規模な人工市場シミュレーション,情報処理学会 第 186 回 ICS 研究発表会, 北海道,2017 年 3 月 2 日-5 日,
106. 宮野修平、大石晃史、島田尚、伊藤伸泰「疎ネットワーク上における間接互惠性に基づく集団形成過程の研究」日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年)・春季 2017 年 3 月
107. 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰「斥力相互作用する自己駆動粒子系における境界の効果」日本物理学会第 72 回年次大会(2017 年)・春季 2017 年 3 月
108. 内種岳詞「ネットワーク道路構造における自動車交通の需要と渋滞の関係考察(口頭発表)」第 56 回 システム工学部会研究会 2017 年 3 月 9 日
109. 水田孝信, 和泉潔,人工市場シミュレーションを用いたバッチオークションの分



- 析, 第 18 回人工知能学会金融情報学研究会, 東京, 2017 年 3 月 10 日
110. 米納 弘渡, 曾根 泰平, 和泉 潔, 金融システムの安定化に資する政府・中央銀行の効果的な救済ルールを検証, 2017 年度 人工知能学会全国大会(第 31 回), 名古屋, 2017 年 5 月 24 日
  111. 藤島大輔, 鎌田十三郎, 長門広洋, 高木由美, 太田能(神戸大), “分散集合ライブラリを用いた人工市場シミュレーションにおける通信と計算のオーバーラップ実現”, 2017 年並列/分散/協調処理に関する『秋田』サマー・ワークショップ (SWoPP2017), 秋田, 2017 年 7 月 28 日
  112. Hideyuki Mizuta, Takashi Imamichi, “Large-scale social simulation framework “X10-based Agent Simulation on Distributed Infrastructure (XASDI)” and applications”, AROB 23rd 2018, B-Con PLAZA, Beppu. JAPAN, Jan. 19, 2018.

③ ポスター発表 (国内会議 7 件、国際会議 9 件)

1. 今井哲郎, 田中敦, “利己的・分散的な多主体による複雑ネットワーク形成モデルの並列計算技術による大規模化へ向けた評価,” 第 10 回ネットワーク生態学シンポジウム予稿集, P26, pp.1-3, 2013 年 9 月.
2. 松島裕康, 山下倫央, 野田五十樹, “実験計画法を応用したパラメータ探索法の分析”, JAWS 2014, 宮崎, 10 月 27-30 日, 2014.
3. 大石晃史, Manuel Cebrian, Andres Abeliuk, 増田直紀 “クラウドソーシング・ジレンマゲームの進化的安定戦略”, 日本人間行動進化学会第6回大会、広島、2013 年 12 月
4. Yohsuke Murase, et al. “Multilayer weighted social network model,” Social Modeling and Simulation + Econophysics Colloquim 2014(神戸市, 2014 年 11 月 4-6 日) (ベストポスター賞受賞) .
5. Masahiro Miyachi, Itsuki Noda, “Case Study of Evaluation of Advanced Public Transportation Systems by Multi-agent Simulation”, Proc. of SMSEC-2014, pp. 4pPS43, 2014 年 11 月 4 日.
6. Keiichiro Izuno, Itsuki Noda, “Effectiveness of Temporal Control Policy of Pedestrians for Congestion”, Proc. of SMSEC-2014, pp. 4pPS48, 2014 年 11 月 4 日.
7. Hajime Inaoka and Nobuyasu Ito, “Implementation of a breadth-first search algorithm on a massive-parallel computer,” Social Modeling and Simulation + Econophysics Colloquim 2014(神戸市, 2014 年 11 月 4-6 日).
8. Y. Asano, N. Ito, H. Inaoka, Y. Murase, T. Imai, and T. Uchitane, “Traffic Simulation of Kobe-city,” Social Modeling and Simulation + Econophysics Colloquim 2014(神戸市, 2014 年 11 月 4-6 日).
9. Hideyuki Mizuta, Hiroki Murata, Kumiko Maeda, Toyotaro Suzumura, Sachiko Yoshihama, “City Traffic Simulation on the Large-scale Agent Simulation Framework”, JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2), IRC of Kobe University and RIKEN AICS, Kobe, Japan, December 2-4, 2014.
10. Takuma Torii, Kiyoshi Izumi, Kenta Yamada. “Whole Tokyo Stock Exchange Market Simulation Project: Design of Financial Market Regulations using Agent-based Simulation”. JST/CREST International Symposium on Post Petascale System Software (ISP2S2), IRC of Kobe University and RIKEN AICS, Kobe, Japan, December 2-4, 2014
11. 南雲将太, 島田尚, 伊藤伸泰「取引市場におけるティックサイズと取引高シェアの関係性に関する数理的解析」2015 年日本物理学会第 70 回年次大会 (早稲田大学早稲田キャンパス、2015 年 3 月 21-24 日)

12. Yohsuke Murase, Modeling the role of relationship fading and breakup in social network formation, 2nd Annual International Conference on Computational Social Science, the Kellogg School of Management, Northwestern University, Evanston, IL US, 2016/6/26.
13. Yohsuke Murase, A web-application framework for parameter-space explorations, 2nd Annual International Conference on Computational Social Science, the Kellogg School of Management, Northwestern University, Evanston, IL US, 2016/6/26.
14. 内種岳詞,伊藤伸泰「道路ネットワーク構造とOD分布が都市自動車交通に与える影響考察」計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2016年12月6日.
15. 平岡喬之, 斥力相互作用する自己駆動粒子系における境界の効果, 日本物理学会第72回年次大会, 大阪大学豊中キャンパス, 2017年3月20日.
16. 竹内 幹雄, 水田 秀行, X10: Performance and Productivity at Scale, 第20回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ(PPL2018), 2018年3月5日

#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (1件)

1. “交通シミュレーション方法、プログラム、およびシステム”, 鈴木 豊太郎, インターナショナル・ビジネス・マシーンス・コーポレーション, 2013年3月27日, 特願2013-066420.

##### ②海外出願 (2件)

1. “TRAFFIC SIMULATION METHOD, PROGRAM, AND SYSTEM”, 鈴木 豊太郎, International Business Machines Corporation, 2014年3月24日, 14/222733, United States

(いかに追記)

2. ”SYSTEM AND METHOD FOR SIMULATING TRAFFIC FLOW DISTRIBUTION WITH APPROXIMATE VEHICLE BEHAVIOR NEAR INTERSECTIONS”, 水田秀行, International Business Machines Corporation, 2015年12月4日, 14/960080, United States

##### ③その他の知的財産権 (特になし)

#### (5)受賞・報道等

##### ①受賞

1. \* 人工知能学会研究会優秀賞, 水田 孝信, 和泉 潔, 八木 勲, 吉村 忍, 2013年6月6日.
2. Best Poster Award: Yohsuke Murase, et al. "Multilayer weighted social network model," Social Modeling and Simulation + Econophysics Colloquium 2014(神戸市, 2014年11月4-6日).
3. JAWS 2015 奨励賞: 川口英俊, 野田五十樹, JAWS 2015 実行委員会, 2015.09.30.
4. 第78回全国大会 学生奨励賞: 川口英俊, 野田五十樹, 情報処理学会, 2016.03.11.

5. SSI 研究奨励賞：内種岳詞，計測自動制御学会 システム・情報部門，2015 年 11 月 18～20 日。

## ②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. 日本経済新聞，東証と東大大学院、株の高速取引で共同研究，2012 年 12 月 10 日，朝刊

## ③その他

### (6)成果展開事例

#### ①実用化に向けての展開

- 開発したジョブ実行管理ソフトウェア「OACIS」について、理研 AICS にて公開中。
- OACIS 普及のための OACIS 講習会を開催している。
- X10 の京コンピュータへの対応版を、IBM(X10 の配布元)より公開中。
- 東京証券取引所との共同研究と、東京証券市場のティックサイズ変更の方針決定のための情報提供。
- RISTEX:問題解決型サービス科学研究開発プログラムにおいて、新しい公共交通システムの事前評価のためのツールとして、上記 OACIS を活用した網羅的シミュレーションを進めている。さらに、この成果をもとにベンチャー企業(株)未来シェアを立ち上げ、シェア型公共交通サービスを提供するビジネスを展開している。この展開において、本課題で開発した網羅的シミュレーション実行の枠組みが活用されている。
- 上記シェア型公共交通サービスについては、総務省: Scope 地域 ICT 振興型研究開発に採択され、その中で網羅的シミュレーションの枠組みが活用されている。課題名:「完全自動リアルタイムフルデマンド交通システム SAV 向けプラットフォームの研究開発」
- 文科省のポスト京萌芽課題に採択され、現在実施中。課題名「複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究(多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発)」
- NEDO 「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」(先導研究)研究開発項目②「次世代人工知能フレームワーク研究・先進中核モジュール研究開発」において、社会レベル行動モデリング・シミュレーションモジュールの研究開発として、OACIS および CrowdWalk を活用中。
- 内閣府 SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」領域:「巨大都市・大規模ターミナル駅周辺地域における複合災害への対応支援アプリケーションの開発」において、OACIS および CrowdWalk を活用中。
- RoboCup の中の災害救助競技部門、RoboCupRescue Simulation リーグにおいて、競技管理フレームワークとして OACIS が採用。公式ツールとして使用されている。
- 和歌山国体(2015)、愛媛国体(2017)、福井国体(2018)において、交通規制や送迎バス運行の計画策定に関する委員会にアドバイザーとして参加、OACIS、Adventure-Mates を活用した助言等を継続的に進めている。

#### ②社会還元的な展開活動

- OACIS と人流シミュレータ CrowdWalk を用いた網羅シミュレーションによる避難対策シミュレーションゲーム「NIGECHIZU SIMULATOR」を以下の展示会等で公開(または公開予定)。一般の来場者への成果普及を行っている。
  - ◆ 金沢 21 世紀美術館「3.11 以後の建築」
    - ・ 2014 年 11 月 1 日-2015 年 5 月 10 日
    - ・ 延べ利用者数:約 8000 人
  - ◆ G 空間 EXPO2014

- 2014年11月13日-15日
- ◆ 産総研一般公開
  - 2015年7月18日
- ◆ 日建設計 NSRI フォーラム
  - 2015年7月28日
- ◆ CEATEC 2015
  - 2015年10月7日-10日
- ◆ 水戸芸術館
  - 2015年11月1日-2016年1月31日

## § 5 研究期間中の活動

### 5. 1 主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2013年1月18日	第1回 Cassia Workshop	東京大学	26人	日立製作所奥山氏、鈴木氏、松本氏の招待講演。
2013年2月14日	第2回 Cassia Workshop	東京大学	18人	Academia Sinica の Prof. Chin-Kun Hu の招待講演。
2013年5月13日	第3回 Cassia Workshop	理研(AICS)	40人	経済物理の研究者の招待講演。
2013年12月11日	第4回 Cassia Workshop	東京大学	25人	領域内のほかチームとの研究交流。
2014年11月4-6日	SMSEC2014 (International Conference on Social Modeling and Simulation + Econophysics Colloquium 2014)	ニチイ学館 神戸ポート アイランドセンター	170人	社会シミュレーション分野の成果発表・研究交流として最初の国際会議 主催者のメンバーとして、野田・伊藤が参画
2015年10月21日	AICS 公開ソフト講習会「OACIS」	理研 AICS	20人	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。
2016年1月21日	AROB2016 オーガナイズドセッション Large scale social simulation: I. agent	B-CON プラザ	30人	AROB2016 において、エージェントシミュレーションをテーマとしたセッションを企画、関係する研究発表を含め、研究者との議論と研究交流を行った。
2016年3月25日	AICS 公開ソフト講習会「OACIS」	HPCI アクセスポイント東京	20人	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。
2016年5月11日	AICS 公開ソフト講習会「OACIS」	東京 HPCI アクセスポイント東京	20人	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。

2016年8月6日	Plham 講習会	東大本郷	20人	経済シミュレーションパッケージ Plham 普及のため、ハンズオン講習会を開催。
2016年9月24日	Plham 講習会	東大本郷	20人	経済シミュレーションパッケージ Plham 普及のため、ハンズオン講習会を開催。
2016年10月25日	OACIS 講習会	産業技術総合研究所臨海副都心センター	20人	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。
2017年1月20日	AROB2017 オーガナイズドセッション Multiscale Social Simulation	B-CON プラザ	30人	AROB2017 において、社会シミュレーションをテーマとしたセッションを企画、関係する研究発表を含め、研究者との議論と研究交流を行った。
2017年2月19日	OACIS Seminar	Georgia 大学	20人	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。
2017年3月9日～10日	OACIS 講習会&ワークショップ	理研 AICS	30人	OACIS と本課題成果普及のため、講習会と社会シミュレーションのワークショップを開催
2017年6月14日	AICS 公開ソフト講習会「OACIS」	理研 AICS	20名	OACIS 普及のため、OACIS の利用法についてハンズオン講習会を開催。

## §6 最後に

本課題では、離散事象・社会現象のシミュレーションという、HPC における新しい応用分野開拓に必要なプログラミング環境について、ポスト京時代を見据えて研究開発を進めることを目標としてきた。この目標に対して設定したマイルストーンはほぼ達成することができたと考えている。ただ、ビッグデータを使ったデータ同化やエージェントの思考部分における再帰的なシミュレーションについては、十分に汎用性のあるツールとしては整備できず、今後の課題として残されている。また、今後、複数事象の連成シミュレーションなどより大規模で計算資源を必要とする課題が明らかになってきているが、これについてはすでに後継のプロジェクトが始まっており、より幅広い分野での社会シミュレーション応用の環境が将来的に整備されると考えている。

本課題では、参画者の多くが各々具体的な応用分野を持ち、その分野での研究を進めていることから、本課題実施中から成果を使った具体的な応用事例や社会還元を行うことができてきたことは、成果普及の面で有効であったと考えている。また、今後も各々の参画者が各分野で成果を活用していくことになっており、今後、幅広い分野での利用が広まると期待している。

5年間のプロジェクトの副産物として、日本における社会シミュレーションコミュニティの核を作ることができたと考えている。社会シミュレーションの分野は、人工知能・経済学・経済物理・物理学・土木工学・防災額など様々な分野で個別に行われていた。今回、チームとして集まった研究者が各々関係する分野とつながりを持っており、研究者の横のつながりが構築できたことは、今後、この分野の研究を推進するうえで大きな礎石となったと考えている。欧州においても International Conference on Computational Social Science が創設され、時期的にも非常にタイムリーであった。

また、今回の CREST は次世代 HPC のためのソフトウェア基盤の整備が主眼であるが、本チームの参画者にとっては、HPC という大きな計算資源を使った社会シミュレーションの高度化という取り組みでもあった。従来の社会シミュレーションでは、限られた計算資源での応用に限定されていたが、今回の取り組みにより、網羅的シミュレーションなど計算資源に裏打ちされた方法で、応用や分析方法を広げられることが実感できたことは、非常に大きな成果と考えている。上記の研究者の横のつながりや国際的な研究分野の盛り上がりと軌を一にして、今後の研究の発展が期待できる。